

ISSN 0536-101X
e-ISSN 2618-7299

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ГЕОДЕЗИЯ
И АЭРОФОТОСЪЕМКА

Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying

69 • 05 • 2025

Научное издание Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)
Published by Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)

Научное издание Московского государственного университета
геодезии и картографии (МИИГАиК)
Published by Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)

Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка

Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying

69 • 05 • 2025

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
	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 Вольфганг	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
	Хосе Хоакин Вилла Ортега	канд. техн. наук; Колумбия
	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 Григорьевич	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.

Подписано в печать 31.10.2025.
Гарнитура Source Serif Pro.
Формат 60×90^{1/8}.
Бумага мелованная.
Печать цифровая.
Объем 17 усл. печ. л.
Тираж 500 экз.
Заказ № 11. 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

Vasilij 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

José Joaquín Vila-Ortega

PhD in Engineering; Colombia

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

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
Illustrations by:
Ekaterina D. Zhuravlyova
Layout design by:
Svetlana V. Ledneva

Published on 31.10.2025.
Font Source Serif Pro.
Format 60×90¹/₈.
Coated paper.
Digital print.
17 printed sheet.
500 copies. Order No. 11.

Editorial Office
Department of Editorial
and Publishing Activities
and Scientometrics

Printed by PrintSide
printside.ru

ГЕОДЕЗИЯ	Липатников Л.А. Об учете динамических эффектов при установлении государственной системы координат на примере прототипа ГСК-2035	8
АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ	Арбузов С.А., Дедкова В.В., Комиссаров А.В., Шляхова М.М. О возможности интеграции трехмерных моделей, полученных из разных источников	22
	Нефедова О.А. Исследование алгоритма автоматического нахождения и измерения связующих точек AKAZE на снимках ледника, полученных с беспилотного воздушного судна	35
	Козин Е.В. Об определении направляющих косинусов вектора луча визирования в системах координат различных камер (сенсоров)	46
ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ	Боярчук М.А., Журкин И.Г., Орлов П.Ю. Постановка задачи и анализ направлений прогнозирования применительно к оценке устойчивого развития территориального образования	54
	Логинов Д.С. Картографическое обеспечение научно-производственной деятельности: отечественный опыт, периодизация и современные проблемы	73
	Ефимова А.П., Крылов С.А. Разработка методики автоматизированного размещения подписей географических названий на мультимасштабной карте	87
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ	Боголюбов И.А., Лобанов А.А., Можаров Г.А. Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с высокими и компромиссными оптическими характеристиками	99
ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ	Гура Д.А., Кузякина М.В., Тихонов Т.А., Караган А.В. Идентификация земельных ресурсов Краснодарского края в целях изучения динамики перераспределения земельного фонда	115
	Букреев Д.А., Черных Е.Г., Сизов А.П. Разработка программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории	125
ХРОНИКА	Памяти Леонида Анатольевича Коновалова	136

GEODESY	Lipatnikov L.A. On Accounting for Dynamic Effects in Establishing the State Coordinate System: A Case Study of the GSK-2035 Prototype	8
EARTH AEROSPACE SURVEY, PHOTOGRAMMETRY	Arbuzov S.A., Dedkova V.V., Komissarov A.V., Shlyakhova M.M. Possibility of Integrating Three-Dimensional Models Obtained from Multi-Source Data	22
	Nefedova O.A. A Study of the Algorithm for Automatically Finding and Measuring AKAZE Connection Points in Glacier Images Taken from the Unmanned Aerial Vehicle	35
	Kozin E.V. On the Determination of the Direction Cosines of the Sighting Beam Vector in the Coordinate Systems of Various Cameras (Sensors)	46
GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY	Boyarchuk M.A., Zhurkin I.G., Orlov P.Yu. Research Objective Definition and Analysis of Forecasting Approaches in the Case of Sustainable Development Assessment of a Territorial Entity	54
	Loginov D.S. Cartographic Support of Scientific and Industrial Activities: National Experience, Periodization, and Current Issues	73
	Efimova A.P., Krylov S.A. Development of a Methodology for the Rapid Placement of Geographical Name Labels on a General Geographic Multi-Scale Map	87
OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS	Bogolyubov I.A., Lobanov A.A., Mozharov G.A. Calculation of a Lens for an Incoherent Optical Correlation Direction Finder with High and Compromise Optical Performance	99
LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING	Gura D.A., Kuzyakina M.V., Tikhonov T.A., Karagyan A.V. Identification of the Krasnodar Territory's Land Resources in Order to Study Land Dynamics	115
	Bukreev D.A., Chernykh E.G., Sizov A.P. Development of a Software Module for Assessing the Spatio-Temporal Dynamics of the Environment-Forming Potential of a Territory	125
CHRONICLE	In Memory of Leonid Anatolyevich Kononov	136



Об учете динамических эффектов при установлении государственной системы координат на примере прототипа ГСК-2035

Л.А. Липатников¹ 

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия

 lipatnikov_l@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Липатников Л.А. Об учете динамических эффектов при установлении государственной системы координат на примере прототипа ГСК-2035 // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-043.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА государственная система координат, координатная основа, трансформирование, деформация, движение литосферных плит

АННОТАЦИЯ Статья посвящена вопросу о преодолении фактически существующего (обусловленного несоответствием теоретического определения государственной системы координат ГСК-2011 ее назначению) ограничения точности координатного обеспечения в России на дециметровом уровне. Сформулированы критерии оптимальности определения государственной системы координат с точки зрения экономически наиболее эффективного удовлетворения запросов основных групп пользователей на интервале более 20 лет. Представлено определение и способ реализации прототипа альтернативной системы координат ГСК-2035 с учетом физической деформации территории. В ГСК-2035 обеспечивается постоянство координат объектов недвижимости, однозначная связь с общеземными системами координат на субсантиметровом уровне точности для всей территории России при максимальной простоте преобразований. Прямоугольные координаты в ГСК-2035 и ITRF2020 будут численно близки на интервале 15 лет после ввода предложенной системы, что делает ее оптимальной для создания единой картографической основы и осуществления навигации повышенной точности по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем без трансформирования. Для достижения наивысшей точности преобразований в ГСК-2035 в $\frac{3}{4}$ случаев на территории РФ достаточно стандартной модели Гельмерта с учетом скоростей изменения параметров. В остальных случаях высокая точность достигается применением постоянного поля скоростей и локальных поправок, являющихся неотъемлемой частью

ГСК-2035. Преобразования координат полностью автоматизированы. Внедрение системы координат с представленными характеристиками является необходимым условием реализации единого высокоточного геоинформационного пространства и соответствующего навигационного поля на всей территории страны, а также повышения эффективности высокоточного координатного обеспечения на один-два порядка.

1 Введение

Реализация земной системы координат (СК) является одной из фундаментальных задач единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения [1]. Земные системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11 установлены в качестве единых государственных СК РФ постановлениями Правительства РФ^{1,2}. Определение СК, приведенное в этих документах, во многом задает способ реализации и, как следствие, предельный уровень точности данных СК, т. е. уровень соответствия реально измеряемых геометрических величин и величин, вычисленных по координатам с учетом необходимых преобразований. Создание ГСК-2011 можно считать началом современного этапа развития отечественной геодезии, т. к. на смену СК-42 и СК-95 пришла трехмерная геоцентрическая СК, максимально приближенная к ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame) на начальную эпоху [2]. Это позволило снять ряд проблем и способствовало широкому внедрению спутниковых технологий, повышению достижимой точности выполнения геодезических работ, а вслед за этим и повышению требований пользователей к точности, в результате чего на первый план сейчас выходит проблема, вероятно, ранее казавшаяся неочевидной. Проблема заключается в значительной деградации точности координатной основы ГСК-2011 со временем. Из-за отсутствия стандартного алгоритма учета динамических эффектов неучитываемая деформация (и, соответственно, погрешность) координатной основы ГСК-2011 постоянно накапливается со скоростью до 1 дм за десятилетие и в настоящее время уже превышает 1 дм для территорий Дальнего Востока. Данная проблема препятствует созданию и долговременному поддержанию на территории России единого высокоточного геоинформационного пространства, соответствующего точности геодезических измерений. Решение проблемы неизбежно будет связано с заменой ГСК-2011, т. к. переопределение модели связи СК с другими системами фактически создает новую реализацию СК.

Решению проблемы установления высокоточных СК для целей геодезии и картографирования российских и сопредельных территорий, а также созданию технических и организационных условий для этого посвящены работы [2–7]. Зарубежный опыт учета динамических эффектов в государственных СК представлен в статье [8]. Моделирование движения литосферных плит для практического применения в геодезии также рассмотрено в работе [4], подготовленной параллельно с настоящим исследованием в рамках НИР «ГЕОТЕХ-Квант».

Цель настоящей работы — представить теоретическое определение и конкретный способ реализации альтернативного варианта государственной СК, позволяющего наиболее эффективно удовлетворять запросы основных групп пользователей координатной основы на интервале более 20 лет.

1 Постановление Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/7187> (дата обращения: 28.04.2025).

2 Постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г. № 1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/109124> (дата обращения: 28.04.2025).

В настоящее время терминология, необходимая для рассмотрения вопроса, не полностью определена российскими нормативными документами, имеются значительные расхождения в международных и отечественных стандартах^{3,4,5}. Поэтому уточним некоторые термины, применяемые в настоящей статье.

Под системой координат будем понимать совокупность ее теоретического определения (*англ.* reference system) и практической реализации — координатной основы.

В современных международных стандартах принято выделять статическую (*англ.* static reference frame) и динамическую (*англ.* dynamic reference frame) координатную основу. В первой координаты объекта постоянны, если он неподвижен относительно локального участка земной поверхности. В динамической координатной основе все объекты движутся вместе с блоками земной коры. Учет движения точек (*англ.* point motion operation) происходит непосредственно в динамической координатной основе: смещение каждой точки рассчитывается по модели ее движения, включающей координаты в начальную эпоху, скорость и в некоторых случаях другие элементы.

Для дальнейшего рассмотрения также выделим две группы земных СК по их функциональному назначению:

- предназначенные для решения задач космической геодезии — их принято называть общеземными СК (ОЗСК);
- служащие для формирования геоинформационного пространства (ГИСК), используемые на практике в географических информационных системах (ГИС), системах автоматизированного проектирования (САПР), а также при выполнении геодезических работ на локальных участках классическими наземными методами.

ОЗСК, такие как ITRS/ITRF, ПЗ-90.11 и WGS84, применяются в глобальном масштабе, для их использования важна корректная связь с небесной СК ICRS/ICRF, поэтому соответствие ориентировки осей ОЗСК определениям Международной службы вращения Земли и систем отсчета является обоснованным. На практике такие СК всегда являются динамическими. Определение координат в ОЗСК при помощи глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) достаточно хорошо автоматизировано и может выполняться с погрешностями менее 1 см. Неудобство использования ОЗСК для решения практических задач заключается в том, что высокоточные координаты всегда необходимо относить к эпохе их определения, без указания которой возникает неопределенность порядка одного метра. Из-за наличия скоростей и других элементов модели движения каждой точки, а также необходимости указывать для каждой точки эпоху в ОЗСК затруднительно вести базы геопространственных данных.

Для целей применения ГИСК, напротив, важнее, чтобы координаты точек земной поверхности оставались неизменными как можно дольше, т. к. на этом интервале времени упрощается ведение баз геопространственных данных. К ГИСК можно отнести СК-95, СК-42, местные, условные СК. В настоящее время также ГСК-2011 трактуется как статическая в соответствии с Объяснением к геодезической системе координат 2011 года⁶. Недостаток ГИСК состоит в том, что высокую точность ее реализации в глобальном масштабе можно обеспечить лишь на коротком интервале времени. Чем обширнее территория, тем сложнее поддерживать координатную основу в актуальном состоянии из-за накапливающейся физической деформации.

Потенциально достижимая точность координатно-временного и навигационного обеспечения на данном этапе развития геодезии во многом определяется

3 ГОСТ 22268-76. Геодезия. Термины и определения. М.: Госстандарт, 1980. 32 с.

4 ISO 19111:2019. Geographic information – Referencing by coordinates. ISO/TC 211, 2020. 143 p.

5 ГОСТ Р 52572-2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006. 11 с.

6 Ефимов Г.Н., Зубинский В.И., Попадьев В.В. Объяснение к геодезической системе координат 2011 года. М.: ЦГКиИПД, 2021. 165 с.

тем, насколько высокую точность преобразования координат возможно обеспечить при переходе между ГИСК и ОЗСК, т. к. именно эта связь является слабым звеном единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения. Техническая сторона автоматизации преобразований в этом звене рассмотрена в работе [9], однако для реализации корректного, однозначного и высокоточного преобразования координат необходимо устранить ряд пробелов в определении государственной СК.

Действующая государственная система координат ГСК-2011 была введена постановлением Правительства РФ одновременно с ПЗ-90.11, изначально предназначенной для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. ПЗ-90.11 является ОЗСК в чистом виде. ГСК-2011 предназначена для решения задач геодезии и картографии, т. е., по сути, для формирования геоинформационного пространства, и поэтому отнесена к классу ГИСК.

При этом ГСК-2011 и ПЗ-90.11 определены в постановлениях Правительства одинаково в части ориентировки их осей. Согласно определению, ориентировка осей ГСК-2011 идентична ITRS, из чего следует, что скорости точек земной поверхности в этой СК будут сопоставимы со скоростями в ITRF. При таком определении вся территория РФ в ГСК-2011 должна двигаться со скоростью до 3 см в год и деформироваться со скоростью до 1 см/год, преимущественно на Дальнем Востоке, из-за взаимного движения литосферных плит. За период, прошедший с момента установления ГСК-2011, это соответствует изменению координат на всей территории РФ на величину порядка 4 дм. Проблема заключается в том, что определение ГСК-2011 и ее практическая реализация не содержат алгоритмов учета движения и деформации территории, что на практике приводит к возникновению ошибок соответствующего порядка.

Для устранения указанной неоднозначности было выпущено Объяснение к геодезической системе координат 2011 года, согласно которому ГСК-2011 фактически применяется на эпоху 2011.0 как статическая система координат. Согласно этому документу, область действия системы ГСК-2011 «ограничена территорией России, поэтому общие изменения координат, вызванные смещениями в мировой системе, можно игнорировать до установления новой реализации системы. Изменения координат пунктов, вызванные изменением конфигурации сети ФАГС из-за тектонических изменений, превысят 10 см (точность топографических планов), по разным оценкам, за 30–40 лет»⁷. Приведенная в Объяснении к геодезической системе координат 2011 года оценка является чрезмерно оптимистичной. Каталоги координат в ГСК-2011 рассогласуются с фактическими результатами измерений в несколько раз быстрее: со скоростью до 1 дм за десятилетие, — что отмечалось в работах [5, 10] и что несложно проверить на основе анализа скоростей смежных пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), например МАГ1 и ОХТК [9]. Поэтому в ГСК-2011 невозможно обеспечивать на интервале более трех лет повсеместное выполнение требования ГОСТ Р 57374-2016 к средней квадратической погрешности взаимного положения пунктов ФАГС (не более 2 см в плане).

Идеальным определением ГИСК представляется такое, при котором в ней координаты точек земной поверхности постоянны на протяжении десятилетий, преобразование координат в другие СК выполняется просто и при этом обеспечивается точность представления реальной геометрии объектов, соответствующая инструментальной точности геодезических измерений на всей территории страны. Очевидно, что невозможно достичь всего этого одновременно для быстро деформируемой территории. Необходимо найти оптимальное решение. При этом задача усложняется тем, что для разных групп пользователей критерии оптимальности будут иметь разный вес. Для геодезических применений наиболее важна предельная точность реализации СК и привязки к ней. Для подавляющего большинства пользователей, например в области умного

⁷ Ефимов Г.Н., Зубинский В.И., Попадьев В.В. Объяснение к геодезической системе координат 2011 года. М.: ЦГКиИПД, 2021. С. 128.

земледелия, роботизации транспорта, важна простота процедуры преобразования между ГИСК и ОЗСК, возможность обойтись без узкоспециализированного геодезического программного обеспечения и дополнительных массивов данных.

Предлагаются следующие критерии оптимальности: универсальность, статичность, практичность, экономичность. Согласно этим критериям, перспективная государственная ГИСК должна:

- максимально удовлетворять запросам всех групп потребителей на всей территории РФ (критерий универсальности);
- гарантировать максимальную неизменность значений координат объектов недвижимости (критерий статичности);
- обеспечивать максимальную простоту процессов определения и преобразования координат в нужную СК для наибольшего количества пользователей с учетом специфики запросов каждой группы (критерий практичности);
- минимизировать затраты на поддержание координатной основы и обеспечение доступа к ней с учетом затрат на развитие необходимой инфраструктуры (критерий экономичности).

Далее изложены теоретическое определение и принцип практической реализации государственной ГИСК, которая соответствует указанным критериям и позволит решить обозначенную проблему.

2 Материалы и методы

Рассмотрим гипотетическую земную систему координат ГСК-2035, по определению отличающуюся от ГСК-2011 следующими положениями:

- координатные оси единой государственной системы координат ГСК-2035 вращаются вместе с Евразийской литосферной плитой относительно осей Международной земной системы отсчета ITRS и совпадают с ними в момент времени 00:00 по UTC 1 января 2035 года;
- система координат ГСК-2035 является статической, т. е. в ней считаются постоянными значения координат всех точек, неподвижных относительно локального участка земной поверхности; при трансформировании значения координат в ГСК-2035 относятся к эпохе 1 января 2035 года.

Способ создания координатной основы ГСК-2035 может быть формализован следующим образом. Каталог координат пунктов государственной геодезической сети и Федеральной сети геодезических станций в системе координат ГСК-2035 вычисляется в результате минимально ограниченного уравнивания геодезической сети под условием равенства нулю семи параметров Гельмерта относительно ITRF2020 с последующим учетом движения пунктов на интервале времени от средней эпохи измерительной кампании до эпохи 2035.0 по формулам

$$\begin{aligned}
 1 \quad & \mathbf{X}_{ГСК2035} = \mathbf{X}_{ITRF2020}(2035.0) = \widehat{\mathbf{X}}_{ITRF2020}(\bar{t}) + \check{\mathbf{V}}(2035.0 - \bar{t}), \\
 2 \quad & \check{\mathbf{V}} = \check{\mathbf{V}}_{EU} + \check{\mathbf{V}}_{grid},
 \end{aligned}$$

где $\mathbf{X}_{ГСК2035}$ — вектор прямоугольных геоцентрических координат $(X \ Y \ Z)^T$ пунктов сети в каталоге ГСК-2035, полученных по результатам уравнивания и прогноза движения;

$\widehat{\mathbf{X}}_{ITRF2020}(\bar{t})$ — вектор оценок прямоугольных геоцентрических координат в ITRF2020, полученный по результатам уравнивания на среднюю эпоху измерительной кампании \bar{t} для каждого пункта;

$\check{\mathbf{V}}$ — вектор скорости, вычисляемый по моделям, являющимся неотъемлемой частью определения ГСК-2035;

$\check{\mathbf{V}}_{EU}$ — вектор скорости точки с координатами $\widehat{\mathbf{X}}_{ITRF2020}$, движущейся вместе с Евразийской плитой согласно модели ITRF2020 PMM [11];

\check{V}_{grid} — вектор остаточной скорости, интерполируемый по регулярной сетке для учета динамических эффектов, включая разность угловых скоростей движения Евразийской литосферной плиты и той плиты, на которой расположен пункт, деформацию земной коры в зоне тектонических разломов, деформацию поверхности вследствие постледниковой отдачи. В качестве примера в прототипе онлайн-сервиса преобразования координат [9] используется билинейно интерполируемая сетка остаточных скоростей с шагом 1° .

Скорость точки литосферной плиты, определяемую по ее угловой скорости согласно модели ITRF2020 PMM [12], можно представить в виде

$$\check{V}_{EU} = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{T}_z \end{pmatrix},$$

где $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ — угловые скорости вращения Евразийской плиты в радианной мере; $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z$ — скорости линейного движения начала модели ITRF2020 PMM относительно осей ITRF2020.

В таком виде параметры модели движения литосферной плиты образуют линейную комбинацию со скоростями изменения параметров трансформирования, что позволяет встроить учет вращения осей системы вместе с Евразийской плитой в систему параметров Гельмерта относительно ITRF2020. Примеры такого подхода — ETRS89⁸ и GDA2020⁹.

При минимально ограниченном уравнивании сетей на территории отдельных государств, как правило, фиксируются только три параметра сдвига барицентра. Для проверки корректности фиксации нулевых значений всех семи параметров Гельмерта предлагается дополнительно выполнить уравнивание с фиксацией только барицентра сети и затем оценить значимость оценок масштаба и разворота по сравнению со стандартными отклонениями этих оценок. Учитывая, что привязка спутниковой геодезической сети выполняется к ITRF2020, созданной методами космической геодезии, следует ожидать, что масштаб и разворот будут незначимыми. Тогда фиксация всех семи параметров Гельмерта будет корректной. В этом случае параметры связи ГСК-2035 с другими СК через связь с ITRF возможно вычислить еще до уравнивания.

3 Результаты

Результатом установления статической СК является координатная основа, представленная как каталогом координат, так и математической моделью трансформирования. В модели связи ГСК-2035 с другими СК предлагается выделить несколько приближений — уровней сложности и точности преобразований координат. Пользователь может выбирать конкретное, нормативно определенное приближение и использовать соответствующую формулу преобразования в зависимости от требований к точности для конкретной задачи.

Нулевое приближение исключает трансформирование между ГСК-2035 и ОЗСК. Например, для навигации повышенной точности возможно использовать совместно без трансформирования модели местности в ГСК-2035 и координаты в ОЗСК, полученные с помощью ГНСС. При этом постоянные координаты в ГСК-2035 считаются приближенно равными координатам в ITRF2020 на текущую эпоху:

8 Altamimi Z., Collilieux X. EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. March 4, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1-Mar-04-2024.pdf> (дата обращения: 28.04.2025).

9 GDA2020. Technical Manual v1.8. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/GDA2020%20Technical%20Manual%20V1.8_published_0.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

$$X_{ГСК2035} \approx X_{ITRF2020}(t).$$

Согласно определению ГСК-2035, с учетом скорости движения Евразийской плиты в 2035 году прямоугольные пространственные координаты в этой системе будут максимально численно близки к текущим координатам в ОЗСК, а на интервале с 2027 по 2042 год упрощение, согласно формуле (4), будет вносить погрешность не более 2 дм по абсолютной величине, что приемлемо во многих случаях для автоматической навигации повышенной точности беспилотных транспортных средств и другой техники. Аналогичное предположение в отношении ГСК-2011 приводило бы на указанном интервале времени к погрешностям от 4 до 8 дм. Поэтому ГСК-2035 является удачным выбором для представления единой картографической основы.

Первое приближение состоит в 14-параметрическом преобразовании Гельмерта между ГСК-2035 и другими СК:

5

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{B'} = (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

6

$$\begin{cases} \Delta X = \Delta X(t_0) + \Delta \dot{X}(t - t_0), \\ \Delta Y = \Delta Y(t_0) + \Delta \dot{Y}(t - t_0), \\ \Delta Z = \Delta Z(t_0) + \Delta \dot{Z}(t - t_0), \\ m = m(t_0) + \dot{m}(t - t_0), \\ \omega_x = \omega_x(t_0) + \dot{\omega}_x(t - t_0), \\ \omega_y = \omega_y(t_0) + \dot{\omega}_y(t - t_0), \\ \omega_z = \omega_z(t_0) + \dot{\omega}_z(t - t_0), \end{cases}$$

Таблица 1

Параметры Гельмерта и скорости их изменения при преобразовании в ГСК-2035 (система Б) из других СК

Table 1

Helmert parameters and their rates of change when transformed to GSK-2035 (system B) from other reference frames

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — линейные элементы трансформирования (сдвиг начала СК А относительно начала СК Б), м;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые параметры, рад;

m — масштабный параметр;

t — момент времени (эпоха), на который выполняется трансформирование;

t_0 — момент времени, на который заданы параметры трансформирования (опорная эпоха параметров).

Исходные данные для вычислений приведены в табл. 1.

Исходная система А	$\Delta X(t_0)$, мм	$\Delta Y(t_0)$, мм	$\Delta Z(t_0)$, мм	$m(t_0)$, 10^{-9}	$\omega_x(t_0)$, 10^{-3} угл. с	$\omega_y(t_0)$, 10^{-3} угл. с	$\omega_z(t_0)$, 10^{-3} угл. с	Статическая СК
	$\Delta \dot{X}$, мм/год	$\Delta \dot{Y}$, мм/год	$\Delta \dot{Z}$, мм/год	\dot{m} , 10^{-9} /год	$\dot{\omega}_x$, 10^{-3} "/год	$\dot{\omega}_y$, 10^{-3} "/год	$\dot{\omega}_z$, 10^{-3} "/год	
ГСК-2011	5,68	20,00	6,86	-0,19	1,497	12,395	-18,017	Да
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	
ПЗ-90.11	-3,20	0,00	-5,30	-0,31	0,019	-0,042	0,002	Нет
	-0,37	-0,25	-0,84	-0,03	-0,085	-0,519	0,753	
СК-42	23 562,68	-140 838,00	-79 763,14	-227,59	-0,241	-334,046	-812,280	Да
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	
СК-95	24 462,68	-130 778,00	-81 523,14	-227,59	-0,241	15,954	-152,280	Да
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	
ITRF2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	Нет
	-0,37	-0,35	-0,74	0,00	-0,085	-0,519	0,753	
ITRF2014	1,40	2,90	-5,40	0,42	0,000	0,000	0,000	Нет
	-0,37	-0,25	-0,94	0,00	-0,085	-0,519	0,753	
ITRF2008	-0,20	1,00	-5,30	-0,31	0,000	0,000	0,000	Нет
	-0,37	-0,25	-0,84	-0,03	-0,085	-0,519	0,753	

Первое приближение учитывает вращение осей ГСК-2035 вместе с Евразийской плитой. Этого достаточно для обеспечения точности преобразования, соответствующей точности геодезических измерений, в случаях трансформирования:

- из ГСК-2035 в статические СК, такие как ГСК-2011 (2011.0), СК-42, СК-95, местные, условные СК на всей территории России;
- между ГСК-2035 и динамическими СК (ITRF, ETRF, ПЗ-90.11 и др.) в пределах недеформируемой части Евразийской плиты.

Второе приближение в дополнение к первому включает учет остаточных скоростей, интерполируемых по регулярной сетке:

$$7 \quad \mathbf{X}_{B'}(t) = \mathbf{X}_{B'}(t) + \check{\mathbf{V}}_{grid}(t - t_0).$$

Сетка является единой для всей территории России и сопредельных территорий. Для недеформируемой части Евразийской плиты остаточная скорость равна нулю и второе приближение эквивалентно первому.

Третье приближение включает учет полного набора региональных и локальных поправок модели — патчей (*англ.* patch), если они определены для конкретной территории:

$$8 \quad \mathbf{X}_{B''}(t) = \mathbf{X}_{B'}(t) + \Delta \mathbf{X}(t).$$

Каждый патч ограничивается в пространстве и времени, включает необходимый для учета деформации набор регулярных сеток элементов функциональной модели в соответствии со стандартом OGC¹⁰. Вектор поправок $\Delta \mathbf{X}(t)$ вычисляется как сумма поправок по всем сеткам всех патчей для данной территории на момент времени t . Патч может включать сетки постоянных поправок скоростей, нелинейных косейсмических, постсейсмических смещений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний и при необходимости другие элементы функциональной модели деформации. Сетки поправок могут вычисляться для отдельных территорий на основе результатов геодезических измерений и нормативно вводиться там, где есть практическая необходимость в повышении точности учета геодинамических эффектов и где работы по созданию таких моделей экономически оправданы. Для территорий, на которых патчи не заданы, значение поправки принимается нулевым, в этом случае третье приближение эквивалентно второму. Каждый патч, введенный в определение ГСК-2035, становится его неотъемлемой частью, после чего фактически создается новая версия координатной основы ГСК-2035, которая должна быть однозначно идентифицирована. Механизм учета деформаций должен быть унифицирован с механизмами версионирования геоинформационных моделей, учитывающих добавление, удаление или изменение геометрии и семантики отдельных объектов.

На данном этапе развития геодезического обеспечения при реализации ГСК-2035 целесообразно ограничиться приближениями с нулевого по второе включительно. Третье приближение поначалу может быть введено номинально, и в отсутствие введенных в определение ГСК-2035 патчей оно не будет сказываться на результатах преобразования.

Для обеспечения прослеживаемости и воспроизводимости результатов преобразования пользователь должен однозначно идентифицировать используемое приближение и версию координатной основы. Наиболее точное приближение следует применять во всех случаях, когда нет уверенности в том, что точности упрощенных формул достаточно для конкретной решаемой задачи.

Далее концепция ГСК-2035 рассмотрена с точки зрения предложенных критериев оптимальности в сравнении с ГСК-2011 и другими альтернативами.

10 Deformation model. Functional model // GitHub, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/opengeospatial/CRS-Deformation-Models> (дата обращения: 28.04.2025).

4 Обсуждение

4.1 Универсальность ГСК-2035

Отсутствие стандартного алгоритма учета движения и деформации блоков земной коры в ГСК-2011 приводит к разноточным результатам трансформирования в ОЗСК в различных регионах. На территории европейской части России и в Западной Сибири скорость движения точек возможно определить по одной из моделей движения литосферных плит, например с помощью онлайн-калькулятора GAGE¹¹, поскольку все модели движения литосферных плит включают Евразийскую плиту и вычисленные на ней скорости, как правило, лучше согласуются с результатами определения скоростей пунктов ФАГС, чем для других плит. Для Дальнего Востока проблема точного и однозначного определения скоростей стоит более остро, поскольку в различных моделях на этой территории выделяется разное количество плит, скорости которых разнятся сильнее в зависимости от выбора модели. При этом применение моделей, в которых плиты представлены твердыми участками сферы, приводит к увеличению погрешностей преобразований в зонах деформации. Таким образом, приемлемая точность координатных преобразований в ГСК-2011 технически могла быть обеспечена только для части территории страны.

Новая система ГСК-2035 позволит обеспечить равный доступ к высокоточным преобразованиям координат на всей территории страны для всех групп потребителей. Это происходит за счет замены реального нерегулярного и для большей части территории неизвестного поля скоростей точек местности на модельное, являющееся частью определения ГСК-2035, в каждой точке которого значение скорости вычисляется строго по известным формулам. Данный подход уже давно зарекомендовал себя в геодезии: в отечественной практике в более широком смысле — при установлении нормальной системы высот (аналогично вместо геоида, определение которого проблематично, вводится строго вычисляемая поверхность — квазигеоид), а за рубежом и применительно к СК, например NZGD2000 [13].

4.2 Статичность ГСК-2035

В отличие от ОЗСК, являющихся динамическими по умолчанию, ГИСК могут быть как статическими, так и динамическими. Пример динамической СК, зафиксированной на литосферной плите для минимизации, но не полного исключения остаточных скоростей, — ETRS89/ETRF. Примеры национальных статических ГИСК — GDA2020, NZGD2020.

Возникает вопрос о том, какой способ реализации лучше соответствует назначению ГИСК. В отечественной геодезической практике, по-видимому под влиянием примера ITRS/ITRF, устоялось представление о динамической СК как о более совершенной в сравнении со статической. В динамической ГИСК сохраняется возможность более точного определения координат одних точек в сопоставлении с другими, что теоретически может быть полезно, если ГИС позволяют хранить и обрабатывать информацию о точности координат отдельных точек, например в виде их ковариационной матрицы. Однако реализация этого подхода на практике была бы крайне сложна как в части нормативно-технического регулирования, так и с точки зрения программной реализации, а выгоды были бы неочевидными. При этом возникнет та же ситуация, которая сложилась в ходе внедрения ГСК-2011, когда для одних точек (пунктов ФАГС)

¹¹ GAGE Plate Motion Calculator. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата обращения: 28.04.2025).

скорости были определены, а для всех остальных — нет. В этом случае избирательный учет скоростей, очевидно, приводил бы к рассогласованию геопространственных данных. Закономерным итогом стал отказ от учета скоростей и переосмысление ГСК-2011 как статической СК. Для СК, в которой остаточные скорости будут на порядок меньше, чем в ГСК-2011, выбор в пользу статичности должен быть еще более очевидным и неизбежным.

ГСК-2035 явно определена как статическая СК. Это позволяет избежать неоднозначности в отношении необходимости включения в структуру баз геопространственных данных полей эпохи и параметров моделей движения отдельных точек. Все динамические эффекты учитываются при трансформировании между ГСК-2035 и ОЗСК, что будет максимально упрощать работу с геопространственными данными, представленными в ГСК-2035.

4.3 Практичность ГСК-2035

Удобство и простота процедур преобразования являются залогом их безошибочного практического применения. Практичность обеспечивается за счет адаптируемого уровня сложности преобразований в зависимости от требуемой точности, а также за счет полной автоматизации строгой процедуры.

В рамках нулевого приближения прямоугольные координаты в ГСК-2035 полагаются эквивалентными координатам в ITRF2020, что позволяет использовать результаты спутникового позиционирования в ОЗСК и картографическую подложку в ГСК-2035 совместно без преобразований, внося таким образом погрешность от 0 до 2 дм для территории России на длительном интервале времени. Высокоточные преобразования координат для территорий, не испытывающих значительной деформации, на которых в РФ, согласно приближенной оценке¹², сосредоточено более $\frac{3}{4}$ спроса на высокоточную геопространственную информацию, преобразование выполняется по модели Гельмерта без дополнительных поправок.

На остальной части территории РФ при высокоточных преобразованиях координат необходимо учитывать нерегулярные деформации, что требует изменения принятого в России подхода к стандартизации и разработки нового поколения онлайн-сервисов и программного обеспечения с открытым исходным кодом. Новый подход реализован при создании прототипа общедоступного онлайн-сервиса преобразования координат¹³, представленного в работе [9]. В настоящее время онлайн-сервис поддерживает ГСК-2035, что позволяет обеспечить полную автоматизацию процедуры координатных преобразований.

4.4 Экономичность ГСК-2035

Во-первых, способ реализации ГСК-2035 предполагает возможность быстрого введения этой СК без значительных предварительных затрат на создание сплошной геодинамической сети вдоль границ литосферных плит на территории РФ, что предполагалось в работе [5].

Во-вторых, введение государственной ГИСК с характеристиками ГСК-2035 является необходимым условием создания системы высокоточного координатного обеспечения, на порядок более эффективной, чем имеющаяся. ГСК-2035 сформулирована таким образом, чтобы обеспечивать максимально простую и высокоточную связь с ОЗСК на текущую эпоху, используемую в ГНСС. Это является ключевым условием повышения на 1–2 порядка эффективности

12 Lipatnikov L. Preliminary Study on 3D Reference Frames for the Russian Federation // FIG Working Week 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2019/ppt/rfp/09_rfp_2019_Lipatnikov.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

13 Сервис преобразования координат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://service.geocentric.kuz> (дата обращения: 28.04.2025).

высокоточного координатного обеспечения в России, наряду с внедрением информационной системы Федеральной сети геодезических станций и технологий позиционирования на основе метода Precise Point Positioning [9].

5 Выводы

Переопределение государственной СК, применяемой для решения задач геодезии и картографии, является необходимым условием стабильной реализации эффективного высокоточного координатного обеспечения на территории России на интервале, составляющем десятки лет. Для этого предложено теоретическое определение и способ практической реализации новой системы координат ГСК-2035, оптимальной с точки зрения сформулированных критериев универсальности, статичности, практичности и экономичности, в соответствии с которыми она должна обеспечивать:

- доступность высокоточной координатной основы для всех групп пользователей на всей территории Российской Федерации;
- постоянство координат объектов недвижимости для использования в реестрах, ГИС, САПР и т. д.;
- оптимизацию сложности преобразований в зависимости от требуемой точности, а также полную автоматизацию строгих координатных преобразований с использованием онлайн-сервиса¹⁴ [9];
- быстрое и экономичное внедрение, не требующее предварительного создания сплошных сетей мониторинга вдоль границ блоков земной коры и иной дорогостоящей инфраструктуры.

Внедрение государственной СК с представленными характеристиками является необходимым условием реализации единого высокоточного геоинформационного пространства и соответствующего по точности навигационного поля на всей территории России, что повысит эффективность высокоточного координатного обеспечения в стране на один-два порядка.

БЛАГОДАРНОСТИ Исследование выполнено в рамках НИР «ГЕОТЕХ-Квант» по заказу ППК «Роскадастр».

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Урличич Ю.М., Финкельштейн А.М., Ревнивых С.Г. и др. Архитектура перспективной системы координатно-временного и навигационного обеспечения России // Труды ИПА РАН. 2009. № 20. С. 20–32.
 2. Горобец В.П., Ефимов Г.Н., Столяров И.А. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года // Вестник СГУГиТ. 2015. № 2(30). С. 24–37.
 3. Савиных В.П., Быков В.Г., Карпик А.П. и др. Организация Международной комиссии по региональной земной геодезической основе Северо-Восточной Евразии // Науки о Земле. 2014. № 1-2. С. 16–25.
 4. Дорогова И.Е. Разработка программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации // Геодезия и картография. 2024. № 7. С. 2–11. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1009-7-2-1.
 5. Бовшин Н.А. Оптимизация условий применения системы ГСК-2011 в Дальневосточном регионе // Геодезия и картография. 2019. № 9. С. 2–9. DOI:10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9.
 6. Вдовин В.С., Дворкин В.В., Карпик А.П. и др. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 1. С. 6–27.

¹⁴ Сервис преобразования координат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://service.geocentric.ru/> (дата обращения: 28.04.2025).

7. Обиденко В.И. Единое высокоточное гомогенное координатное пространство территорий и местные системы координат: пути гармонизации // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 46–62. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-46-62.
8. Карпик А.П., Дорогова И.Е. Анализ мирового опыта ввода полудинамических систем координат и территориальных реализаций систем координат // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 4. С. 16–30. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-4-16-30.
9. Липатников Л.А. Онлайн-сервис преобразования координат // Геодезия и картография. 2025. № 3. С. 2–12. DOI:10.22389/0016-7126-2025-1017-3-2-12.
10. Бовшин Н.А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011 // Геодезия и картография. 2019. № 2. С. 2–14. DOI:10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
11. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. 2023. Vol. 97. No. 5. P. 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
12. Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., et al. ITRF2020 Plate Motion Model // Geophysical Research Letters. 2023. Vol. 50. No. 24. P. e2023GL106373. DOI:10.1029/2023GL106373.
13. Blick G., Grant D. The implementation of a semi-dynamic datum in New Zealand – ten years on // Proceedings of the XXIV FIG International Congress 2010. Sydney, 11–16 April 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts01c/ts01c_blick_grant_3975.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

АВТОР **Липатников Леонид Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск, Россия
кафедра космической и физической геодезии, Институт геодезии и менеджмента
канд. техн. наук
 0000-0002-5082-4062

Поступила 01.05.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



On Accounting for Dynamic Effects in Establishing the State Coordinate System: A Case Study of the GSK-2035 Prototype

Leonid A. Lipatnikov¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 lipatnikov_l@mail.ru

CITATION Lipatnikov LA. On Accounting for Dynamic Effects in Establishing the State Coordinate System: A Case Study of the GSK-2035 Prototype. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-043.

KEYWORDS national datum, reference frame, transformation, deformation, tectonic plate motion

ABSTRACT The article is devoted to overcoming the decimeter-level limit of positioning accuracy, resulting from inconsistency between the purpose of the national datum GSK-2011 and its underlying theoretical definition. The criteria for the optimal definition of the national datum are formulated in respect to the most cost-effective satisfying of user needs at a time interval of more than 20 years. A definition and a method of implementation of datum prototype, designated GSK-2035, are presented. GSK-2035 enables accounting for the physical deformation of the territory, while ensuring the constancy of the coordinates of real estate objects, unambiguous transformation to ITRF at a sub-centimeter accuracy level for the entire territory of Russia with maximum simplicity of transformations. The cartesian coordinates in GSK-2035 and ITRF2020 will be numerically close within 15 years after the introduction of the proposed datum, which makes it optimal for creating a unified cartographic layer and allows it to be used for GNSS navigation with relatively high accuracy even without transformation. In order to achieve the highest accuracy of transformations in GSK-2035, in nearly three quarters of cases in the territory of the Russian Federation, the standard Helmert model with parameters' rates is sufficient. In other cases, high accuracy is achieved by applying a constant velocity field and local corrections, which are an integral part of GSK-2035. The transformations are fully automated. The introduction of a reference frame with the presented characteristics is a prerequisite for the implementation of a unified high-precision geo-information space and a navigation field of the corresponding accuracy throughout the territory of Russia. That would also provide increase in the efficiency of high-precision positioning by one or two orders of magnitude comparing to current procedures of accessing the national datum.

ACKNOWLEDGEMENTS The research was carried out within the framework of the GEOTECH-Kvant research project commissioned by the Roskadastr Public Law Company.

- REFERENCES**
1. Urlichich YuM, Finkel'shtein AM, Revnivykh SG, et al. Arkhitektura perspektivnoi sistemy koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniya Rossii [The architecture of prospective PNT-System of Russia]. *Transactions of IAA RAS*. 2009;20: 20–32. (In Russian).
 2. Gorobets VP, Efimov GN, Stolyarov IA. Opyt Rossiiskoi Federatsii po ustanovleniyu gosudarstvennoi sistemy koordinat 2011 goda [Experience of Russian Federation in establishment of national coordinate system 2011]. *Vestnik SSUGT*. 2015;2(30): 24–37. (In Russian).
 3. Savinykh VP, Bykov VG, Karpik AP, et al. Organizatsiya Mezhdunarodnoi komissii po regional'noi zemnoi geodezicheskoi osnove Severo-Vostochnoi Evrazii [Organization of the North East Eurasia reference frame]. *Geo Science*. 2014;1-2: 16–25. (In Russian).
 4. Dorogova IE. Razrabotka programmno-matematicheskoi modeli dvizhenii zemnoi kory dlya territorii Rossiiskoi Federatsii [Developing a software and the Earth's crust movements' mathematical model for the Russian Federation's territory]. *Geodesy and Cartography*. 2024;7: 2–11. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1009-7-2-1.
 5. Bovshin NA. Optimizatsiya uslovii primeneniya sistemy GSK-2011 v Dal'nevostochnom regione [On perfecting the employment of GSK-2011 reference frame in the Far East territory]. *Geodesy and Cartography*. 2019;9: 2–9. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9.
 6. Vdovin VS, Dvorkin VV, Karpik AP, et al. Problemy i perspektivy razvitiya aktivnykh sputnikovyykh geodezicheskikh setei v Rossii i ikh integratsii v ITRF [Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(1): 6–27. (In Russian).
 7. Obidenko VI. Edinoe vysokotochnoe gomogennoe koordinatnoe prostranstvo territorii i mestnye sistemy koordinat: puti garmonizatsii [A single high-precision homogeneous coordinate space of territories and local coordinate systems: ways of harmonization]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(2): 46–62. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-46-62.
 8. Karpik AP, Dorogova IE. Analiz mirovogo opyta vvoda poludinamicheskikh sistem koordinat i territorial'nykh realizatsii sistem koordinat [Analysis of world experience in introducing semi-dynamic coordinate systems and territorial implementations of coordinate systems]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(4): 16–30. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-4-16-30.
 9. Lipatnikov LA. Onlain-servis preobrazovaniya koordinat [Web service for coordinate operations]. *Geodesy and Cartography*. 2025;3: 2–12. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2025-1017-3-2-12.
 10. Bovshin NA. Vysokotochnye koordinatnye GNSS-opredeleniya v sisteme GSK-2011 [High-precision GNSS-positioning in GSK-2011 reference frame]. *Geodesy and Cartography*. 2019;2: 2–14. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
 11. Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*. 2023;97(5): 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
 12. Altamimi Z, Métivier L, Rebischung P, et al. ITRF2020 Plate Motion Model. *Geophysical Research Letters*. 2023;50(24): e2023GL106373. DOI:10.1029/2023GL106373.
 13. Blick G, Grant D. The implementation of a semi-dynamic datum in New Zealand – ten years on. *Proceedings of the XXIV FIG International Congress 2010. Sydney, 11–16 April 2010*. Available from: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts01c/ts01c_blick_grant_3975.pdf (Accessed 28 April 2025).

AUTHOR **Leonid A. Lipatnikov**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Department of Space and Physical Geodesy, Institute of Geodesy and Management
PhD in Engineering

 0000-0002-5082-4062

Submitted: May 01, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



О возможности интеграции трехмерных моделей, полученных из разных источников

**С.А. Арбузов¹✉, В.В. Дедкова¹,
А.В. Комиссаров¹, М.М. Шляхова¹**

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия

✉ s.a.arbuzov@sgugit.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Арбузов С.А., Дедкова В.В., Комиссаров А.В., Шляхова М.М. О возможности интеграции трехмерных моделей, полученных из разных источников // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 22–34. DOI:10.30533/GiA-2025-039.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА трехмерное моделирование, стереофотограмметрический метод, беспилотное воздушное судно, наземная стереосъемка фасадов, модель интерьера, фотограмметрическая обработка

АННОТАЦИЯ В статье на примере объектов капитального строительства рассмотрена возможность интеграции трехмерных моделей внешнего и внутреннего пространства для решения различных задач, в том числе для целей информационного моделирования и создания цифровых двойников. Выполнен аналитический обзор методик создания трехмерных моделей объектов и территорий. В работе предложена технологическая схема основных этапов построения трехмерной модели объектов местности на основе съемки с беспилотного воздушного судна, наземной стереосъемки фасада и внутренних помещений здания. Описан математический аппарат по объединению двух трехмерных моделей, построенных в разных системах координат, в единую 3D-модель. Изложены результаты фотограмметрической обработки стереосъемки с воздуха, наземной съемки фасадов зданий камерой смартфона (построение базовой модели) и съемки внутреннего пространства здания (построение модели интерьера) камерой Sony Alpha ILCE-6000. Объединение модели интерьера с базовой моделью может быть выполнено по опорным точкам, измеренным при помощи тахеометра. Объединенная с 3D-моделью внутреннего помещения трехмерная модель здания, которая построена по представленной методике, может найти применение в реставрационных работах, бесшовной навигации, при решении задач гражданской обороны и защиты населения от чрезвычайных ситуаций.

1 Введение

В настоящее время развиваются технологии информационного моделирования и создания цифровых двойников застроенных территорий, основанные на трехмерном моделировании объектов. Условно трехмерные модели зданий и сооружений можно разделить на две группы: модели, полученные с использованием только наружной (внешней) съемки, и трехмерные модели интерьеров.

Основными способами получения исходных данных для трехмерного моделирования являются методы дистанционного зондирования и традиционные геодезические съемки¹ [1]. Выбор технических средств получения информации о пространственном положении точек моделируемого объекта зависит от охвата территории, необходимой оперативности, точности и дискретности измерений.

Для наземной съемки применяют мало- и среднеформатные цифровые камеры, мобильные и наземные лазерные сканеры [2], специализированные наземные стереофотограмметрические системы (например, Trimble A10) [3, 4] и ГНСС-приемники с интегрированной камерой.

Интерьерная съемка выполняется малоформатными цифровыми камерами или специализированными камерами глубины (например, Kinect) [5–7].

При пилотируемой воздушной съемке применяются метрические среднеформатные камеры, многокамерные съемочные системы, лазерные сканеры или гибридные съемочные системы (например, Leica CityMapper)². В беспилотных авиационных съемочных комплексах используют малоформатные (в том числе и специализированные для трехмерного моделирования территорий [2]), среднеформатные цифровые камеры и воздушные лазерные сканеры².

Использование данных, полученных из разных источников, дает возможность избежать мертвых зон [4, 8], увеличить детальность и информативность 3D-моделей, расширяя, таким образом, сферы их применения. Комбинирование данных наземного и воздушного лазерного сканирования позволяет получать пространственные координаты точек рельефа даже на залесенной местности. Применение комбинированного подхода рассматривается в ряде работ¹ [8–12], посвященных исследованию объектов архитектуры и строительства.

Современный город динамично развивается, прирастая новыми территориями, увеличивается доля точечной застройки, изменяется инфраструктура. Трехмерные модели застроенной территории должны периодически актуализироваться вслед за изменениями на местности [13].

Авиационные средства позволяют проводить съемку на большой площади с достаточной оперативностью для организации мониторинга изменений территории относительно фиксированной даты. Трехмерная модель, построенная по материалам аэросъемок, будет являться базовой моделью, отдельные элементы которой в дальнейшем можно дополнять, обновлять и уточнять другими средствами, в том числе и наземными съемками, обеспечивающими большую детальность при моделировании фасадов и элементов инфраструктуры.

При выполнении фасадной стереосъемки могут использоваться системы, включающие неметрические камеры, и глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) для получения линейных элементов внешнего ориентирования снимков. Такие средства измерения обеспечивают достаточно высокую точность и оперативность получения данных. При этом без применения ГНСС модель будет строиться в фотограмметрической системе координат, а внешнее ориентирование модели — осуществляться с использованием опорных точек, полученных по базовой модели.

1 Hadi R.H. The Integration of Multi-Source Photogrammetric Datasets for Virtual 3D City Modeling Applications. Thesis for M.Sc. in Technical Surveying Engineering. Middle Technical University, Republic of Iraq, 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/340117761_The_Integration_of_Multi-Source_Photogrammetric_Datasets_for_Virtual_3D_City_Modeling_Applica (дата обращения: 23.03.2025).

2 Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: учебник. М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. 328 с.

Отсутствие перекрывающихся участков моделей, обеспечивающих наличие достаточного количества соответственных точек для представления моделей в единой системе координат, и невозможность применения ГНСС-оборудования внутри помещения представляют сложность для интеграции интерьерных моделей с базовой моделью застроенной территории.

Задача внешнего ориентирования модели интерьера возникает, например, при построении моделей культурного наследия [14], при реализации беспроводной навигации снаружи и внутри зданий [15] и (или) при решении задач противодействия чрезвычайным ситуациям [16].

Для ориентирования интерьерной модели относительно общей модели могут использоваться два варианта математических преобразований. В первом случае применяются формулы перехода от одной системы координат к другой:

$$1 \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{BH} = X_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z, \\ Y_{BH} = Y_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z, \\ Z_{BH} = Z_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z, \end{array} \right.$$

где X_{BH}, Y_{BH}, Z_{BH} – координаты объекта во внешней системе координат; X, Y, Z – координаты объекта в исходной системе координат; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ – направляющие косинусы, являющиеся тригонометрическими функциями углов Эйлера (α, ω, κ) ³; X_0, Y_0, Z_0 – линейные смещения системы координат относительно внешней системы координат или, согласно терминологии фотограмметрии, линейные элементы внешнего ориентирования⁴.

При наличии систематических ошибок измерений в ориентируемой модели или при создании интерьерной модели без опорных данных уравнения (1) следует дополнить масштабным коэффициентом, тогда они примут вид

$$2 \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{BH} = X_0 + a_1tX + a_2tY + a_3tZ, \\ Y_{BH} = Y_0 + b_1tX + b_2tY + b_3tZ, \\ Z_{BH} = Z_0 + c_1tX + c_2tY + c_3tZ. \end{array} \right.$$

Во втором случае для перехода от одной системы координат к другой можно использовать метод проективной геометрии или уравнения аффинного преобразования вида

$$3 \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{BH} = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_0, \\ Y_{BH} = B_1X + B_2Y + B_3Z + B_0, \\ Z_{BH} = C_1X + C_2Y + C_3Z + C_0, \end{array} \right.$$

где $A_0, A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, B_2, B_3, C_0, C_1, C_2, C_3$ – коэффициенты аффинного преобразования.

Выражения (3) преобразуются к двумерному виду, например, если у исходной и внешней систем координат система отсчета и направление осей совпадают, в этом случае коэффициенты $A_2, B_2, C_0, C_1, C_2, C_3$ равны 0.

Во всех случаях задача преобразования системы координат решается в два этапа:

- 1) определение элементов внешнего ориентирования или коэффициентов аффинного преобразования;
- 2) пересчет всех элементов модели во внешнюю систему координат на основании вычисленных на первом этапе значений.

Первый этап требует решения уравнения (1), (2) или (3) каким-либо методом, но в большинстве случаев применяется метод наименьших квадратов. Для решения уравнений (1) – (3) необходимы опорные данные или опорные точки, минимальное количество которых для каждого вида уравнения меняется. Так, для уравнений (1), (2) минимальное количество точек составляет три.

3 Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: учебник. М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. 328 с.

4 Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 552 с.

При этом в уравнения (1) и (2) входят тригонометрические функции, как правило, они решаются итерационным методом Ньютона. Такой метод решения с точки зрения теории уравнивания является нестрогим⁵. Уравнения (3) линейные, а следовательно, решаются классическим способом метода наименьших квадратов, что является строгим методом уравнения⁵.

Для преобразования моделей в единую систему координат с оценкой точности необходимо, чтобы на каждой модели были отображены одноименные точки в количестве не менее четырех штук в разных частях моделей.

Вопросу внешнего ориентирования моделей интерьеров посвящены работы [17, 18], где описана возможность объединения моделей по координатам точек оконных проемов. Недостатком этого подхода является зависимость от точности базовой трехмерной модели. Ошибки идентификации точек проемов, погрешности в координатах точек базовой модели приведут к деформациям и снижению точности модели интерьера.

В данной статье для внешнего ориентирования модели интерьера предлагается использовать координаты опорных точек, получаемые в результате тахеометрической съемки в помещении, при этом ориентирование тахеометра выполняется по точкам с известными координатами, снятым через оконный проем.

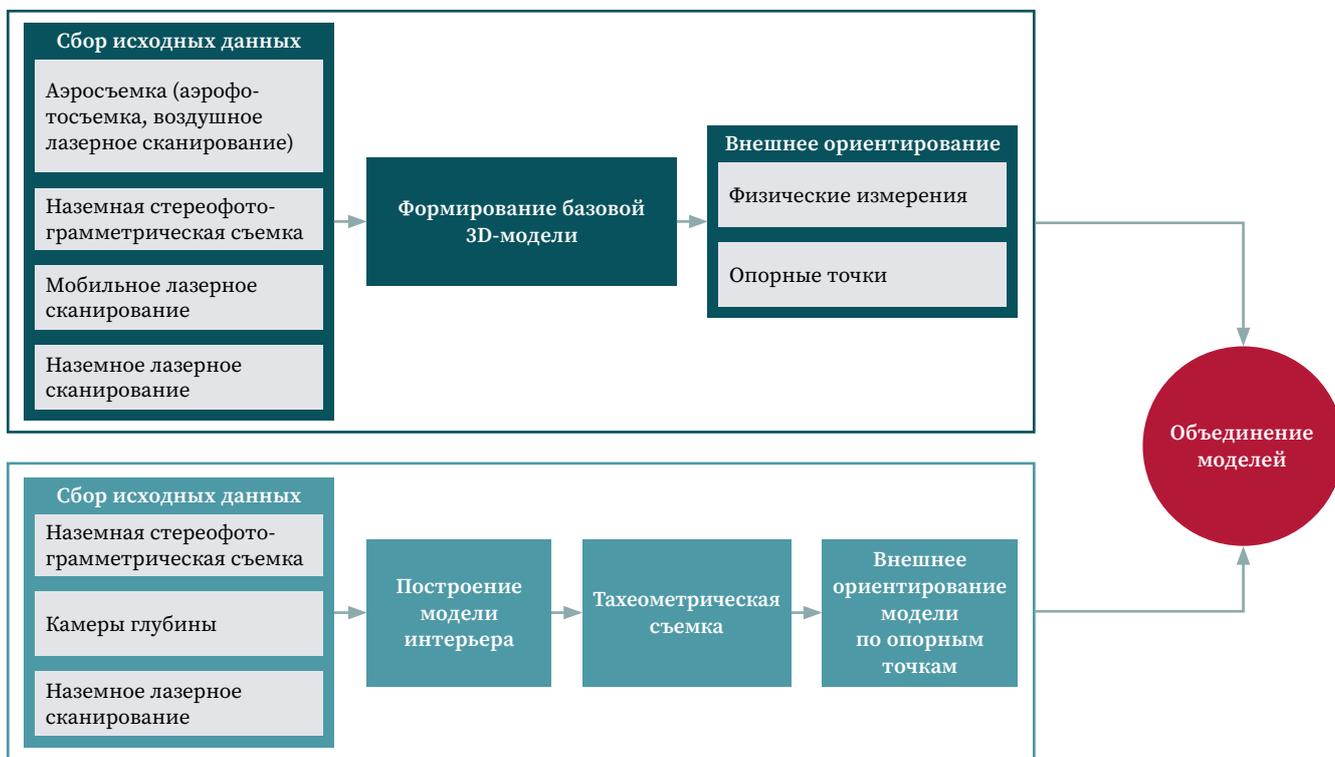
Обобщенная технологическая схема основных этапов построения трехмерной модели объектов местности, полученной в результате комбинирования данных из различных источников, представлена на рис. 1.

Рис. 1 

Технологическая схема основных этапов построения комбинированной трехмерной модели

Fig. 1

Technological scheme of main stages of combined 3D model building



2 Материалы и методы

Цель работы заключается:

- в исследовании возможности выполнения внешнего ориентирования моделей интерьера по результатам тахеометрической съемки опорных точек в помещении;

⁵ Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. М.: Недра, 1977. 367 с.

Рис. 2 

Измерение точек на аэро- и наземных снимках

Fig. 2

Measuring points on aerial and ground images

Аэроснимок / The aerial image



Наземный снимок / The ground image



— в создании трехмерной модели сооружения в результате обработки пространственных данных — материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна (БВС), наземной фасадной съемки и интерьерной съемки помещения.

Сбор исходных данных осуществлен тремя способами: аэрофотосъемка выполнена с БВС «Геоскан 401» с установленной на борту цифровой камерой Sony Alpha ILCE-6000 (получено 194 снимка), наземная съемка фасада здания проведена камерой смартфона OPPO A78 (получено 15 снимков), интерьерная съемка — цифровой камерой Sony Alpha ILCE-6000, установленной на штатив (получено 12 снимков). Фотограмметрическая обработка выполнена в программном обеспечении Agisoft Metashape.

На этапе подготовительных работ камеральной обработки осуществлены проверка качества исходных данных и отбраковка снимков ненадлежащего качества, после чего материалы съемки импортированы в программное обеспечение.

На первом этапе обработки по материалам аэрофотосъемки с БВС и наземной съемки были построены модели и затем объединены между собой. По материалам аэрофотосъемки получена трехмерная модель здания — базовая модель («Проект 1»), а по материалам наземной съемки — модель фасада («Проект 2»).

После импорта снимков и каталога координат опорных и контрольных точек в проект, согласно общей методике фотограмметрической обработки в программном обеспечении Agisoft Metashape, выполнено построение сети фототриангуляции, построено плотное облако точек. Координаты опорных и контрольных точек для «Проекта 1» получены по результатам ГНСС-измерений в статическом режиме. Для «Проекта 2» координаты опорных точек получены с помощью электронного тахеометра в безотражательном режиме, после чего они измерены в проекте; построены плотный массив точек, полигональная модель и текстура. После оценки точности моделей из двух проектов они были объединены в одну модель.

Для измерения точек на фасаде здания в «Проекте 1» подобраны снимки, на которых видны фасады. Измерены также точки на модели, полученной по материалам наземной съемки (рис. 2).

Перед объединением трехмерная модель в виде облака точек, полученная по материалам аэрофотосъемки, предварительно отредактирована: удалена область фасада модели здания. После объединения проектов модель фасада здания, построенная

на основе наземных снимков, была совмещена с базовой моделью.

На рис. 3 представлено сравнение моделей: слева вид фасада трехмерной модели здания по материалам аэрофотосъемки с БВС, справа — после объединения двух моделей.

Визуальная оценка свидетельствует о том, что качество отображения деталей фасада в объединенной модели лучше, чем в модели, построенной только по снимкам аэрофотосъемки. Подобная методика может применяться в условиях недостаточности исходных данных для моделирования, например когда невозможна вертикальная съемка моделируемых объектов с помощью БВС мультироторного типа.

Рис. 3

Сравнение фасадов трехмерной модели, полученной по материалам аэрофотосъемки с БВС, и объединенной модели

Fig. 3

Comparison of facades of 3D model based on UAV-survey and the combined model

Модель, полученная по материалам аэрофотосъемки с БВС /
The 3D model based on UAV-survey

Объединенная модель / The combined model



Рис. 4

Закрепленные маркеры

Fig. 4

Coded targets

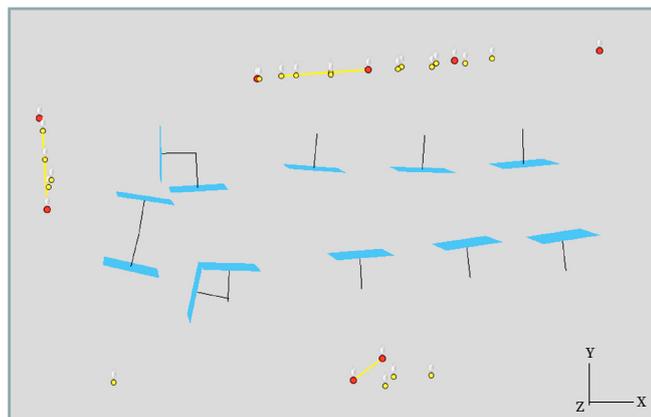


Рис. 5

Положение центров фотографирования снимков, масштабных линеек, опорных и контрольных точек

Fig. 5

Position of the centers of photographing images, scale lines, reference and control points



Условные обозначения

- контрольная точка
- опорная точка
- масштабная линейка

На втором этапе выполнено построение трехмерной модели интерьера помещения в виде облака точек. Для улучшения процесса поиска связующих точек на однотонных стенах помещения предварительно были размещены кодовые марки. Контроль качества построения модели осуществлен с помощью масштабных линеек и контрольных точек, полученных из тахеометрической съемки.

Для внешнего ориентирования модели применялись координаты опорных точек, полученные электронным тахеометром, который был установлен в моделируемом помещении. Координаты точки стояния прибора были вычислены методом обратной засечки по результатам тахеометрической съемки. Для определения координат станции использовались точки на местности с известными координатами, попадавшие в зону видимости прибора через окно. Измерения выполнялись посредством вежи с отражателем. После этого в помещении были измерены восемь опорных точек на стенах и получены их координаты (рис. 4). Координаты опорных и контрольных точек были импортированы в проект, и затем было выполнено внешнее ориентирование модели. Были построены плотный массив точек и полигональная текстурированная модель. На рис. 5 показано положение центров фотографирования снимков, масштабных линеек, опорных и контрольных точек.

3 Результаты и обсуждение

В ходе проведения оценки точности были получены результаты, представленные в табл. 1, 2.

Экстерьерная и интерьерная модели созданы независимо с разной плотностью и точностью измерений в единой системе координат. Модели могут быть объединены в один файл или загружены в программную среду (система автоматизированного проектирования, веб-ГИС) с разделением по слоям для дальнейшей работы (рис. 6–7).

Предложенная методика позволяет выполнять актуализацию моделей, регулировать точность и детальность каждой модели (или ее фрагмента) отдельно в зависимости от задач, для решения которых данная модель предназначена.

Таблица 1 
Результаты оценки точности моделей по опорным и контрольным точкам

Table 1
Results of the models accuracy assessment using ground control points and check points

Вид съемки	Оборудование	Количество опорных / контрольных точек	СКО опорных / контрольных точек, м			GSD, м
			X	Y	Z	
Аэрофотосъемка	Alpha ILCE-6000 (f = 20 mm)	4 / 10	0,03 / 0,05	0,037 / 0,090	0,050 / 0,280	0,018
Наземная стереосъемка фасада	OPPO A78 (f = 4,05 mm)	6 / 5	0,03 / 0,09	0,020 / 0,150	0,040 / 0,130	0,005
Аэрофотосъемка и наземная стереосъемка	Alpha ILCE-6000, OPPO A78	10 / 15	0,07 / 0,80	0,116 / 0,220	0,150 / 0,430	0,018 / 0,005
Интерьерная съемка	Alpha ILCE-6000 (f = 20 mm)	8 / 19	0,01 / 0,02	0,019 / 0,028	0,006 / 0,006	0,0008

Таблица 2 
Результаты оценки точности модели интерьера по масштабным линейкам

Table 2
Results of the interior model accuracy assessment using scale bars

Названия маркеров	Расстояние, м	Ошибка, м	Общая ошибка, м
target 81_target 87	1,816	-0,0055	0,0173
target 64_target 100	2,470	0,0008	
target 86_target 94	1,380	-0,0148	
target 62_target 74	1,312	-0,0147	
target 7_target 78	1,958	-0,0322	

Рис. 6 
Положение модели помещения относительно модели, полученной по материалам аэрофотосъемки и наземной стереосъемки

Fig. 6
The position of the room model relative to the model obtained from aerial and ground stereo photography

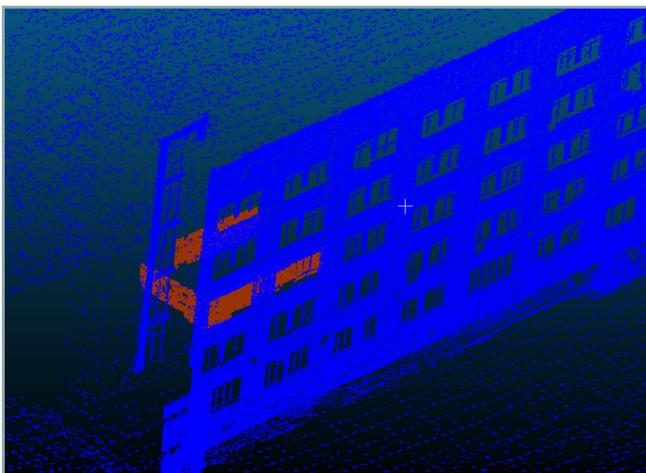


Рис. 7 
Комбинированная модель (вид снаружи)

Fig. 7
Combined model (outdoor view)



4 Выводы

Выполненные исследования показали работоспособность и следующие преимущества предложенной методики:

1. Высокая детальность позволяет использовать получаемую модель для indoor-навигации, разработки планов эвакуации, проведения спасательных операций при ограниченной видимости и т. д.
2. Представленные экстерьерная и интерьерная модели могут применяться для комплексного решения инженерных задач, поскольку в требованиях существующих нормативных документов для наружной части зданий достаточно точности 10–20 см, а для внутренних объектов необходимо получать координаты с точностью 0,5–5 см^{6,7,8,9,10}. Кроме того, подобный подход к созданию моделей разной точности позволяет сократить объем хранимой информации, поскольку если судить о точности модели в целом, а не об отдельных ее точках (пикетах), то величина погрешности должна быть примерно соизмерима с детальностью.

Возможно повышение точности создания трехмерной интерьерной модели в результате использования опорных точек, измеренных электронным тахеометром.

Современное съемочное оборудование позволяет оперативно получать высокодетальные модели объектов капитального строительства не только снаружи, но и изнутри (интерьерная съемка).

Рассмотренная методика внешнего ориентирования модели интерьера применима только в условиях прямой видимости опорных точек с точки стояния тахеометра. Измерения могут быть затруднены при съемке с верхних этажей многоэтажных зданий, в условиях залесенной местности или высокой плотности застройки.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Altuntas C. Three-Dimensional Digitization of Environments and Buildings for Smart City Applications // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2021. Vol. XLVI-4/W5-2021. P. 65–71. DOI:10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-65-2021.
 2. Păulescu A.A., Ștefan M.E. 3D Modeling of Buildings Using Drones // Journal of Young Scientist. 2019. Vol. 7. P. 179–182.
 3. Cera V., Campi M. Evaluating the Potential of Imaging Rover for Automatic Point Cloud Generation // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W3. P. 147–154. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-147-2017.
 4. Федоровский А.А. Особенности применения методики наземной стереофотограмметрической съемки с прямой пространственной привязкой
-
- 6 СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. М.: Минстрой России, 2016. 126 с.
 - 7 Приказ Минземстроя РФ от 4 августа 1998 г. № 37 «Об утверждении Инструкции о проведении учета жилищного фонда в Российской Федерации». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901739482> (дата обращения: 19.03.2025).
 - 8 ГОСТ Р 58945-2020. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений параметров зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2020. 27 с. Данный документ не является обязательным к исполнению. Основание — приказ Министерства промышленности и торговли РФ № 687 от 2 апреля 2020 г. «Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/564577621> (дата обращения: 19.03.2025).
 - 9 СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Общие указания. М.: Стандартинформ, 2017. 83 с.
 - 10 СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартинформ, 2018. 45 с.

- для трехмерного моделирования объектов местности // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66, № 5. С. 73–86. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-73-86.
5. Abdulmajeed W.R., Mansoor R.Z. Implementing Kinect Sensor for Building 3D Maps of Indoor Environments // International Journal of Computer Applications. 2014. Vol. 86. No. 8. P. 18–22. DOI:10.5120/15005-3182.
 6. Józków G., Toth C., Koppányi Z., et al. Combined Matching of 2D and 3D Kinect™ Data to Support Indoor Mapping and Navigation // ASPRS 2014 Annual Conference. Louisville, Kentucky, USA, 23–28 March 2014. New York: Curran Associates, 2014. P. 164–174.
 7. Henry P., Krainin M., Herbst E., et al. RGB-D mapping: Using Kinect-Style Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments // The International Journal of Robotics Research. 2012. Vol. 31. No. 5. P. 647–663. DOI:10.1177/0278364911434148.
 8. Алтынцев М.А., Геращенко Г.Д. Исследование точности трехмерного моделирования по данным съемки с помощью наземного лазерного сканера Geomax Zoom 300 // Сборник материалов XVIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 18–20 мая 2022 г.: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 1. С. 76–85. DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-76-85.
 9. Скрыпицына Т.Н., Воротилов А.Г., Кочнева Д.А. и др. Особенности съемки и методика моделирования частично разрушенных архитектурных объектов по фотограмметрическим данным // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». М.: Географический факультет МГУ, 2024. Т. 30, ч. 1. С. 556–567. DOI:10.35595/2414-9179-2024-1-30-556-567.
 10. Молоков П.В., Щербаков В.М. Создание трехмерных моделей объектов историко-культурного наследия с использованием наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Пространственные данные: наука и технологии. 2024. Т. 15, № 1. С. 46–61. DOI:10.30533/scidata-2024-15-09.
 11. Шестопалова О.Л., Шестопалов Р.П. Об интеграции BIM-технологии информационного моделирования зданий с методами фотограмметрии при построении цифровых моделей объектов в архитектурно-строительной отрасли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 138–143. DOI:10.24412/2071-6168-2022-8-138-144.
 12. Алтынцев М.А. Методика интеграции данных наземного и воздушного лазерного сканирования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67, № 1. С. 26–41. DOI:10.30533/GiA-2023-007.
 13. Billen R., Cutting-Decelle A.F., Marina O., et al. 3D City Models and Urban Information: Current Issues and Perspectives. European COST Action TU0801. Les Ulis: EDP Sciences, 2014. 118 p. DOI:10.1051/TU0801/201400001.
 14. Wei S., Liu C., Tang N., et al. Indoor and Outdoor Multi-Source 3D Data Fusion Method for Ancient Buildings // Journal of Measurements in Engineering. 2022. Vol. 10. No. 3. P. 117–139. DOI:10.21595/jme.2022.22710.
 15. Claridades A.R.C., Lee J. Defining a Model for Integrating Indoor and Outdoor Network Data to Support Seamless Navigation Applications // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10. No. 8. P. 565. DOI:10.3390/ijgi10080565.
 16. Tashakkori H., Rajabifard A., Kalantari M. A New 3D Indoor/Outdoor Spatial Model for Indoor Emergency Response Facilitation // Building and Environment. 2015. Vol. 89. P. 170–182. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.02.036.
 17. Cohen A., Schönberger J.L., Speciale P., et al. Indoor-Outdoor 3D Reconstruction Alignment // Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9907. P. 285–300. DOI:10.1007/978-3-319-46487-9_18.
 18. Koch T., Korner M., Fraundorfer F. Automatic Alignment of Indoor and Outdoor Building Models Using 3D Line Segments // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Las Vegas, NV, USA, 26 June – 1 July 2016. Red Hook: Curran Associates, 2016. P. 10–18. DOI:10.1109/CVPRW.2016.91.

АВТОРЫ Арбузов Станислав Андреевич

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск, Россия
кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования,
Институт геодезии и менеджмента
канд. техн. наук

 0009-0003-0763-3222

Дедкова Валерия Вячеславовна

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия

кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования,
Институт геодезии и менеджмента

канд. техн. наук

 0009-0004-0809-6550

Комиссаров Александр Владимирович

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия

кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования,
Институт геодезии и менеджмента

д-р техн. наук, доцент

 0000-0003-2625-2997

Шляхова Мария Михайловна

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия

кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования,
Институт геодезии и менеджмента

канд. техн. наук, доцент

 0000-0003-0689-3404

Поступила 02.04.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Possibility of Integrating Three-Dimensional Models Obtained from Multi-Source Data

Stanislav A. Arbuzov¹ , **Valeriya V. Dedkova¹**,
Aleksandr V. Komissarov¹, **Mariya M. Shlyakhova¹**

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 s.a.arbuzov@sgugit.ru

CITATION Arbuzov SA, Dedkova VV, Komissarov AV, Shlyakhova MM. Possibility of Integrating Three-Dimensional Models Obtained from Multi-Source Data. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 22–34. DOI:10.30533/GiA-2025-039.

KEYWORDS three-dimensional modeling, stereophotogrammetric method, unmanned aerial vehicle, ground-based stereo photography of facades, indoor 3D model, photogrammetric processing

ABSTRACT The article considers the possibility of integrating outdoor and indoor three-dimensional models of buildings to solve various problems, including information modeling and the creation of “digital twins”. An analytical review of methods for creating three-dimensional models of objects and territories is provided. The paper proposes a technological scheme for the main stages of building a three-dimensional model of terrain objects based on unmanned aerial vehicle photography, ground-based stereo photography of the facade and indoor model. A mathematical apparatus for combining two three-dimensional models made in different coordinate systems into a single 3D model is described. The article presents results of photogrammetric processing of aerial stereo photography, ground-based photography of building facades with a smartphone camera (build of a base model), and photography of the interior space of a building (indoor model) with a Sony Alpha ILCE-6000 camera. The indoor model can be combined with the base model using reference points measured with a total station. Combined 3D model according to the presented methodology can be used in carrying out restoration work, tasks of “seamless” navigation, and tasks of civil defense and emergency situations.

REFERENCES 1. Altuntas C. Three-Dimensional Digitization of Environments and Buildings for Smart City Applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2021;XLVI-4/W5-2021: 65–71. DOI:10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-65-2021.

2. Păulescu AA, Ștefan ME. 3D Modeling of Buildings Using Drones. *Journal of Young Scientist*. 2019;7: 179–182.
3. Cera V, Campi M. Evaluating the Potential of Imaging Rover for Automatic Point Cloud Generation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017;XLII-2/W3: 147–154. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-147-2017.
4. Fedorovskiy AA. Osobennosti primeneniya metodiki nazemnoi stereofotogrammetricheskoi s"emki s pryamoj prostranstvennoi privyazkoi dlya trekhmernogo modelirovaniya ob"ektov mestnosti [Features of the application method of terrestrial stereophotogrammetric survey with direct georeferencing for three-dimensional modeling of terrain objects]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(5): 73–86. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-73-86.
5. Abdulmajeed WR, Mansoor RZ. Implementing Kinect Sensor for Building 3D Maps of Indoor Environments. *International Journal of Computer Applications*. 2014;86(8): 18–22. DOI:10.5120/15005-3182.
6. Józkw G, Toth C, Koppanyi Z, et al. Combined Matching of 2D and 3D Kinect™ Data to Support Indoor Mapping and Navigation. *ASPRS 2014 Annual Conference. Louisville, Kentucky, USA, 23–28 March 2014*. New York: Curran Associates; 2014: 164–174.
7. Henry PR, Krainin M, Herbst E, et al. RGB-D Mapping: Using Kinect-Style Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments. *The International Journal of Robotics Research*. 2012;31(5): 647–663. DOI:10.1177/0278364911434148.
8. Altyntsev MA, Geraschenko GD. Issledovanie tochnosti trekhmernogo modelirovaniya po dannym s"emki s pomoshch'yu nazemnogo lazernogo skanera Geomax Zoom 300 [The study of 3D modelling accuracy using terrestrial laser scanning data of Geomax Zoom 300]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of the XVIII International scientific congress, May 18–20, 2022*. In 8 vol. Novosibirsk: SGUGiT; 2022;1: 76–85. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-76-85.
9. Skrypitsyna TN, Vorotilov AG, Kochneva DA, et al. Osobennosti s"emki i metodika modelirovaniya chastichno razrushennykh arkhitekturnykh ob"ektov po fotogrammetricheskim dannym [Features of the survey and methods of modelling partially destroyed architectural objects based on photogrammetric data]. *Proceedings of the International Conference "InterCarto. InterGIS"*. Moscow: MSU, Faculty of Geography; 2024;30(1): 556–567. (In Russian). DOI:10.35595/2414-9179-2024-1-30-556-567.
10. Molokov PV, Shcherbakov VM. Sozdanie trekhmernykh modelei ob"ektov istoriko-kul'turnogo naslediya s ispol'zovaniem nazemnogo lazernogo skanirovaniya i aerofotos"emki [Creation of 3D models of historical and cultural heritage objects using terrestrial laser scanning and aerial photography]. *Spatial Data: Science and Technology*. 2024;15(1): 46–61. (In Russian). DOI:10.30533/scidata-2024-15-09.
11. Shestopalova OL, Shestopalov RP. Ob integratsii BIM-tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya zdaniy s metodami fotogrammetrii pri postroenii tsifrovyykh modelei ob"ektov v arkhitekturno-stroitel'noi otrasli [On the integration of BIM technology of building information modeling with photogrammetry methods in the construction of digital models of objects in the architectural and construction industry]. *Izvestiya TulGU. Engineering Science*. 2022;8: 138–143. (In Russian). DOI:10.24412/2071-6168-2022-8-138-144.
12. Altyntsev MA. Metodika integratsii dannykh nazemnogo i vozdušnogo lazernogo skanirovaniya [The technique of terrestrial and airborne laser scanning data fusion]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2023;67(1): 26–41. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-007.
13. Billen R, Cutting-Decelle AF, Marina O, et al. *3D city models and urban information: Current issues and perspectives. European COST Action TU0801*. Les Ulis: EDP Sciences; 2014. 118 p. DOI:10.1051/TU0801/201400001.
14. Wei S, Liu C, Tang N, et al. Indoor and Outdoor Multi-Source 3D Data Fusion Method for Ancient Buildings. *Journal of Measurements in Engineering*. 2022;10(3): 117–139. DOI:10.21595/jme.2022.22710.

15. Claridades ARC, Lee J. Defining a Model for Integrating Indoor and Outdoor Network Data to Support Seamless Navigation Applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021;10(8): 565. DOI:10.3390/ijgi10080565.
16. Tashakkori H, Rajabifard A, Kalantari M. A New 3D Indoor/Outdoor Spatial Model for Indoor Emergency Response Facilitation. *Building and Environment*. 2015;89: 170–182. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.02.036.
17. Cohen A, Schönberger JL, Speciale P, et al. Indoor-Outdoor 3D Reconstruction Alignment. *Lecture Notes in Computer Science*. 2016;9907: 285–300. DOI:10.1007/978-3-319-46487-9_18.
18. Koch T, Korner M, Fraundorfer F. Automatic Alignment of Indoor and Outdoor Building Models Using 3D Line Segments. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Red Hook: Curran Associates; 2016: 10–18. DOI:10.1109/CVPRW.2016.91.

AUTHORS **Stanislav A. Arbuzov**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Institute of Geodesy and Management
 PhD in Engineering
 0009-0003-0763-3222

Valeriya V. Dedkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Institute of Geodesy and Management
 PhD in Engineering
 0009-0004-0809-6550

Aleksandr V. Komissarov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Institute of Geodesy and Management
 Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor
 0000-0003-2625-2997

Mariya M. Shlyakhova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Institute of Geodesy and Management
 PhD in Engineering, Associate Professor
 0000-0003-0689-3404

Submitted: April 02, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Исследование алгоритма автоматического нахождения и измерения связующих точек AKAZE на снимках ледника, полученных с беспилотного воздушного судна

О.А. Нефедова¹✉

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

✉ o.nefedova2011@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Нефедова О.А. Исследование алгоритма автоматического нахождения и измерения связующих точек AKAZE на снимках ледника, полученных с беспилотного воздушного судна // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-036.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА беспилотная аэросъемка, аэроснимки ледника, связующие точки, детектор, дескриптор, фототриангуляция, цифровая модель рельефа

АННОТАЦИЯ Данная работа направлена на исследование эффективности алгоритма AKAZE, адаптированного для обработки имеющих слабо выраженную текстуру изображений поверхности ледников. Ледниковые поверхности представляют собой вызов для традиционных методов обработки снимков, поскольку поиск связующих точек в данном случае отличается большой сложностью. В исследовании была проведена предварительная обработка изображений, что позволило повысить точность нахождения связующих точек, необходимых для уравнивания блока снимков. С использованием языка программирования Python был реализован алгоритм AKAZE для поиска и измерения связующих точек на снимках с беспилотных воздушных судов. Затем изображения были переданы в программный комплекс PHOTOMOD 7 для уравнивания блока и создания цифровой модели рельефа. Был также выполнен полный цикл обработки этого же блока в программном комплексе PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape для нахождения оптимального решения. Сравнительный анализ полученных матриц высот продемонстрировал эффективность алгоритма AKAZE в обработке сложных ледниковых поверхностей.

1 Введение

Аэрофотосъемка ледников с использованием беспилотных воздушных судов (БВС) становится все более актуальным и востребованным инструментом для изучения изменений окружающей среды [1–3]. В последние десятилетия такие методы наблюдения приобрели особую популярность, поскольку они позволяют получать высококачественные и детализированные изображения, охватывающие обширные площади за короткие промежутки времени, и выводить гляциологические исследования на совершенно новый уровень [4–5]. При этом важно понимать, что с возрастанием объема собранных данных эффективная обработка и анализ аэрофотоснимков требуют использования продуманных алгоритмов компьютерного зрения. Это стало основным направлением современных исследований.

Ледниковые поверхности на аэрофотоснимках характеризуются выраженной однородностью, что создает определенные сложности при обработке данных. Существенное влияние на качество получаемых изображений оказывает фактор освещения: в пасмурную погоду контрастность теряется практически полностью, что делает поверхность ледника однородной и лишенной каких-либо контуров.

В работе [6] внимание сосредоточено на методах автоматического нахождения и измерения связующих точек на примере пяти отдельных стереопар аэрофотоснимков, полученных с БВС. Это исследование позволило выявить критически важные проблемы, такие как неравномерное освещение, сложный рельеф и однородность поверхности ледников, и определить наиболее подходящие алгоритмы нахождения связующих точек для таких снимков.

Настоящая статья является логическим продолжением предыдущего исследования и посвящена более сложной задаче — обработке и анализу целого блока изображений, полученных в ходе одной сессии съемки. Этот переход к обработке больших групп изображений представляет собой значительное расширение нашего первоначального подхода и предполагает более сложные требования к алгоритмам обработки. Основное внимание в настоящей работе уделено алгоритму AKAZE (*англ.* Accelerated-KAZE) [7] с адаптированными параметрами, который зарекомендовал себя как эффективное средство в обнаружении и сопоставлении соответственных точек в условиях, характерных для съемки ледников.

2 Материалы и методы

Алгоритм AKAZE представляет собой мощный инструмент для обнаружения и описания характерных точек на изображениях, который стал широко применяться в области компьютерного зрения. Авторами данного метода являются П.Ф. Алькантарилья (P.F. Alcantarilla), Х. Нуэво (J. Nuevo), А. Бартоли (A. Bartoli) [7]. Его специфика заключается в эффективной работе с изображениями, имеющими различную текстуру и освещение, что делает его особенно подходящим для анализа аэроснимков ледников. Алгоритм AKAZE инвариантен к масштабу, повороту и аффинным преобразованиям.

В этой части работы детально рассмотрены принципы действия алгоритма AKAZE, а также изменения, которые были внесены в его параметры для повышения качества обработки изображений ледников.

Алгоритм построен на основе математической структуры FED (*англ.* Fast Explicit Diffusion) [8]. Она предназначена для выявления характерных точек на изображениях — важного этапа в компьютерном зрении и обработке изображений. FED интегрирована в пирамидальную систему, что позволяет эффективно обрабатывать данные на различных уровнях масштабирования. Благодаря этому подходу значительно ускоряются нелинейные пространственные вычисления. Это особенно важно при работе с большими изображениями или набором данных.

Кроме того, для описания найденных характерных точек применяют модифицированный локально-разностный двоичный дескриптор (англ. Modified-Local Difference Binary, M-LDB). Этот дескриптор извлекает информацию об изменениях градиента и учитывает особенности нелинейного масштабирования. Использование M-LDB позволяет создать более устойчивое представление характерных точек, что, в свою очередь, улучшает качество сопоставления и анализа изображений, особенно в сложных условиях.

Одним из ключевых изменений, которое было предложено для адаптации алгоритма AKAZE к малоконтрастным изображениям, является снижение порога чувствительности при обнаружении характерных точек. В стандартных настройках алгоритма может происходить отсеивание значительного числа потенциально полезных точек из-за слишком строгих требований к их качеству. Понижение этого порога позволяет увеличить число обнаруженных характерных точек.

Кроме того, было изменено количество уровней пирамид, используемых в алгоритме. Пирамидальная структура подразумевает создание множества копий изображения, каждая из которых представлена в уменьшенном размере [9]. Пирамида изображений является системой изображений (рис. 1)¹, формирующейся поэтапно из исходного изображения. На каждом этапе происходит преобразование, в результате которого уменьшается количество строк и столбцов, что позволяет создать последовательные версии с меньшим разрешением¹. Увеличение числа уровней пирамиды приводит к исчезновению мелких деталей изображения ледника, поэтому следует уменьшить число уровней пирамиды.

Для достижения высокой эффективности работы алгоритма AKAZE необходима предварительная обработка изображений. Этот этап направлен на улучшение общего качества входных данных, что существенно влияет на точность последующего анализа и обнаружения связующих точек. В исследовании используются методы, направленные на улучшение четкости и контрастности изображений.

Первым шагом в процессе предварительной обработки является коррекция контрастности, которую следует повысить. Следующий важный этап — это повышение резкости изображений. Ледниковые фотографии нередко содержат тонкие детали, которые могут затусшеываться из-за недостаточной контрастности. Совокупность данных методов предварительной обработки существенно улучшает качество изображений, что, в свою очередь, способствует повышению надежности и точности обнаружения связующих точек.

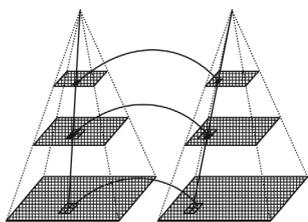
При оценке эффективности предложенного метода особое значение приобретает анализ цифровой модели рельефа (ЦМР), которая служит индикатором качества выполненных измерений и является целью фотограмметрической обработки снимков. Следует отметить, что точность получаемых результатов в значительной степени определяется распределением связующих точек на исследуемой территории. Их оптимальное распределение позволяет существенно повысить достоверность вычисления элементов внешнего ориентирования (ЭВО), что отражается на общей точности создаваемой модели.

В исследовании приводятся результаты уравнивания блока снимков ледника и построения ЦМР, выполненных на основе нахождения связующих точек с помощью алгоритма AKAZE и фотограмметрических систем PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape.

Для исследования был использован блок из 457 снимков на территорию ледника. Они были получены на территорию холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в районе трех полярных станций: «Бхарати» (Индия), «Прогресс» (Россия), «Чжуншань» (Китай). Снимки были получены в рамках 62-й Российской арктической экспедиции с использованием беспилотного летательного аппарата «Геоскан 201» с камерой Sony DSC-RX1R (фокусное расстояние 35 мм, GSD = 0,057 м). На борту был установлен ГНСС-приемник геодезического класса.

Рис. 1 
Пирамида изображений

Fig. 1
Pyramid of images



¹ Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: учебник для вузов. М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. 328 с.

3 Результаты и обсуждение

На первом этапе была выполнена предварительная обработка всего блока исходных снимков в программном комплексе Adobe Photoshop CC 2014. Были увеличены параметры контрастности и резкости на 25 %. На следующем этапе работы для нахождения связующих точек использовался адаптированный алгоритм AKAZE, написанный на языке Python с установленной библиотекой OpenCV. В данном алгоритме пороговое значение чувствительности при нахождении характерных точек по умолчанию составляет 0,02. Однако в рамках эксперимента это значение было снижено до 0,001. По умолчанию в алгоритме AKAZE количество уровней пирамид составляет 4. В рамках эксперимента значение было уменьшено вдвое для нахождения большего числа связующих точек. После автоматического нахождения и измерения связующих точек они были экспортированы в программный комплекс PHOTOMOD 7.

Дальнейшая обработка изображений выполнялась в программном комплексе PHOTOMOD 7 с целью построения ЦМР. На рис. 2 представлена схема блока с перекрытиями между снимками.

Сначала было проведено уравнивание блока снимков с использованием координат центров проекции. Расхождения по связующим точкам между моделями представлены в табл. 1.

Затем методом SGM (*англ.* Semi-Global Matching) была построена плотная ЦМР с разрешением 24,2 см/пикс. На рис. 3 представлена полученная ЦМР. Как видно, наибольшее значение высоты – 112,59 м, а наименьшее составило –6,85 м.

Таким образом, в ходе первого эксперимента были выполнены идентификация связующих точек посредством модифицированного алгоритма AKAZE и последующий экспорт выявленных точек в программный комплекс PHOTOMOD 7, где осуществлялась дальнейшая обработка блока изображений.

В целях сравнительного анализа была проведена альтернативная обработка того же блока изображений исключительно в среде PHOTOMOD 7, при этом связующие точки определялись с применением встроенных алгоритмов программного комплекса. Расхождения по связующим точкам (между стереопарами) представлены в табл. 2.

Далее также была построена ЦМР (рис. 4), как и в первом случае, методом SGM с разрешением 24,2 см/пикс.

Рис. 2 
Схема блока
Fig. 2
Block diagram

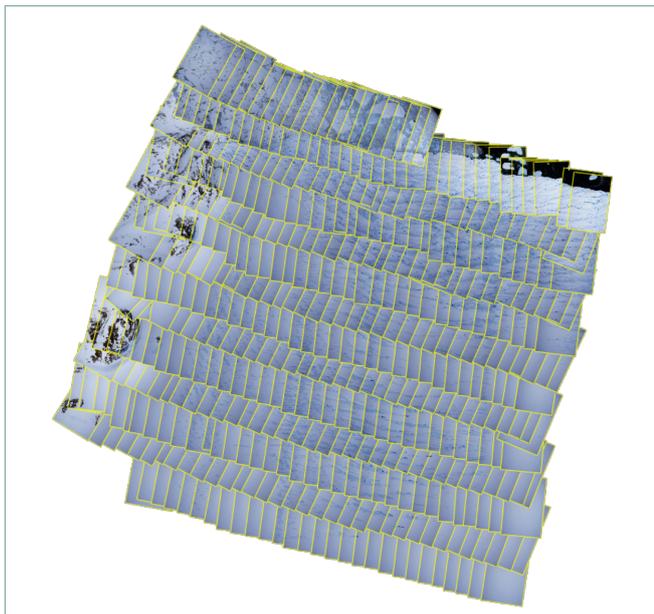


Таблица 1 
Расхождения по связующим точкам согласно алгоритму AKAZE

Table 1
Discrepancies in connecting points according to the AKAZE algorithm

	Среднеквадратичное отклонение	Средняя ошибка по модулю
m_{xy} м	0,08	0,03
m_y м	0,11	0,05
m_z м	0,50	0,23
E_{xy} м	0,14	0,07

Таблица 2 
Расхождения по связующим точкам согласно алгоритму PHOTOMOD 7

Table 2
Discrepancies in connecting points according to the PHOTOMOD 7 algorithm

	Среднеквадратичное отклонение	Средняя ошибка по модулю
m_{xy} м	0,15	0,14
m_y м	0,18	0,15
m_z м	0,49	0,31
E_{xy} м	0,20	0,17

Рис. 3 
Плотная ЦМР (эксперимент 1)
Fig. 3
Dense DEM (the 1th experiment)

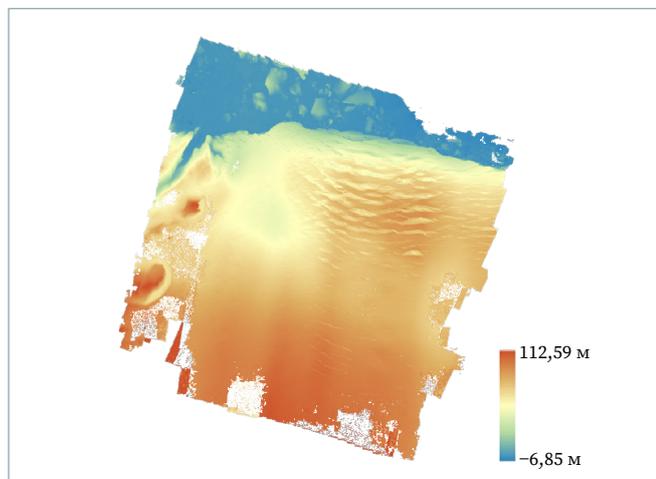


Рис. 4 
Плотная ЦМР (эксперимент 2)
Fig. 4
Dense DEM (the 2nd experiment)

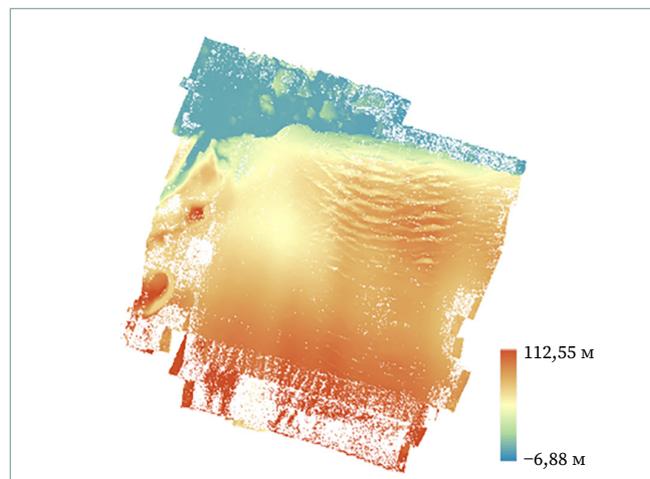
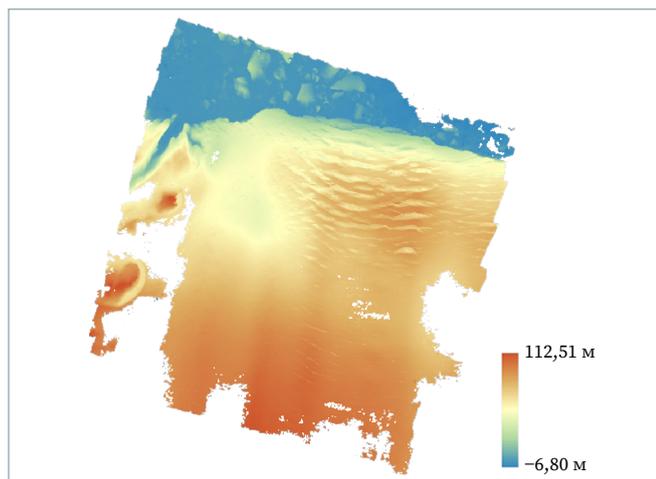


Рис. 5 
Плотная ЦМР (эксперимент 3)
Fig. 5
Dense DEM (the 3rd experiment)



Как видно по рис. 4, наибольшее значение высоты — 112,55 м, а наименьшее составило –6,88 м. На матрице высот большое количество дыр. Это происходит из-за наличия фотограмметрических разрывов (отсутствия ЭВО некоторых снимков), вызванных отсутствием связующих точек или их малым количеством на некоторых снимках [10].

Сравним методы по числу найденных связующих точек и обработанных стереопар. Результаты представлены в табл. 3.

Сравнение двух методов показало, что алгоритм PHOTOMOD 7 обнаружил на 6591 связующую точку больше по сравнению с алгоритмом AKAZE. Однако алгоритм AKAZE не сумел выявить связующие точки на трех изображениях, в то время как алгоритм PHOTOMOD 7 не смог найти связующие точки на 37 изображениях.

Дополнительно (для сравнения) в программном комплексе Agisoft Metashape была проведена обработка блока изображения с построением ЦМР (рис. 5)

с разрешением 24,2 см/пикс. Получены следующие результаты обработки: было обнаружено 704 967 связующих точек, ошибка репроецирования составила 0,61 м.

Таблица 3 
Сравнение количества связующих точек и обработанных изображений

Table 3
Comparison of the number of tie points and processed images

Маршрут	AKAZE		PHOTOMOD 7	
	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте
1	1955	27 / 27	1163	22 / 27
2	3385	31 / 33	2609	28 / 33
3	2359	33 / 34	3040	30 / 34
4	3024	33 / 33	3516	32 / 33
5	2723	33 / 33	3994	30 / 33
6	2367	33 / 33	3224	29 / 33
7	2183	33 / 33	3143	33 / 33
8	2280	33 / 33	3706	33 / 33

Маршрут	АКАZE		PHOTOMOD 7	
	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте
9	2933	33 / 33	3216	33 / 33
10	3304	33 / 33	4192	32 / 33
11	3404	33 / 33	5586	28 / 33
12	4303	33 / 33	3402	29 / 33
13	4222	33 / 33	3520	30 / 33
14	3969	33 / 33	4691	31 / 33
Всего	42 411	454 / 457	49 002	420 / 457

На рис. 6 представлен пример распределения связующих точек по полю изображения после нахождения и измерения связующих точек разными алгоритмами. Как видно, наилучшее распределение точек по полю снимка у алгоритма АКАZE.

При анализе количества связующих точек наилучшие показатели продемонстрировал алгоритм, реализованный в программном комплексе Agisoft Metashape. При этом статистический анализ распределения связующих точек показал, что большинство точек, идентифицированных алгоритмом Agisoft Metashape, концентрируется вокруг какого-либо контура, а не равномерно по снимку.

Поскольку распределение связующих точек влияет в первую очередь на вычисление ЭВО снимков, было выполнено сравнение ЭВО, полученных в результате уравнивания сети точек, измеренных с помощью алгоритма АКАZE, алгоритмами PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape. В табл. 4 и 5 представлены минимальные и максимальные значения по всем шести элементам разности, а также среднее квадратичное отклонение и среднее значение.

Рис. 6  Распределение связующих точек по полю снимка

Fig. 6 Distribution of tie points across the image field



Таблица 4  Величина расхождений в ЭВО АКАZE – PHOTOMOD 7

Table 4 The amount of discrepancies in the EOP АКАZE – PHOTOMOD 7

Параметр	Элемент					
	X, м	Y, м	Z, м	roll, град	pitch, град	yaw, град
min	0,07	0,03	-0,02	0	0	0,01
max	3,21	1,88	7,09	0,35	0,12	0,32
Среднее (по модулю)	0,81	0,49	0,45	0,08	0,04	0,11
Среднеквадратичное отклонение	0,90	0,57	0,58	0,11	0,05	0,14

Таблица 5  Величина расхождений в ЭВО АКАZE – Agisoft Metashape

Table 5 The amount of discrepancies in the EOP АКАZE – Agisoft Metashape

Параметр	Элемент					
	X, м	Y, м	Z, м	roll, град	pitch, град	yaw, град
min	0,09	-0,1	-0,11	0	0	0,01
max	2,22	1,67	3,08	0,44	0,14	0,18
Среднее (по модулю)	0,70	0,33	0,39	0,10	0,03	0,10
Среднеквадратичное отклонение	0,79	0,45	0,54	0,14	0,05	0,12

Рис. 7 
Значения величин
среднеквадратичного
отклонения по шести
элементам

Fig. 7
The average standard deviation
of values for six elements

Условные обозначения
 AKAZE – Agisoft Metashape
 AKAZE – PHOTOMOD 7

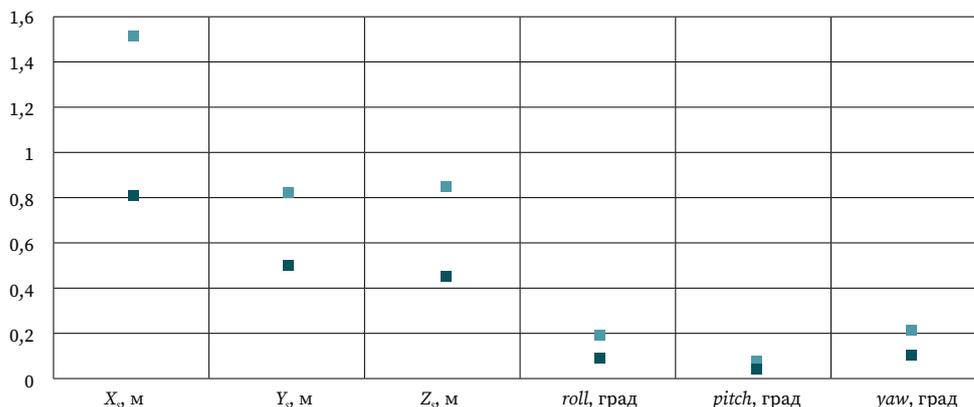


Рис. 8 
Разность матриц высот AKAZE – PHOTOMOD 7

Fig. 8
AKAZE – PHOTOMOD 7 height matrix difference

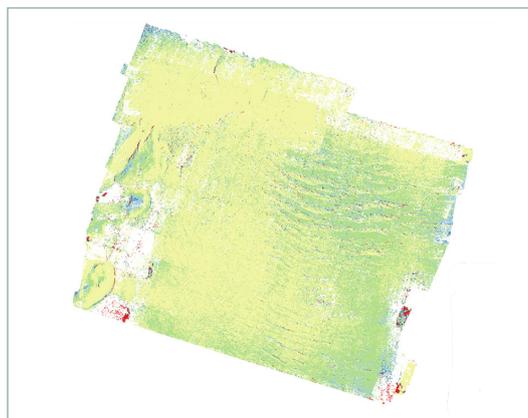
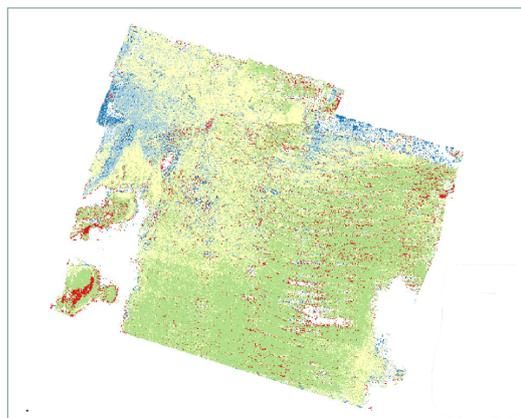


Рис. 9 
Разность матриц высот AKAZE – Agisoft Metashape

Fig. 9
AKAZE – Agisoft Metashape height matrix difference



Условные обозначения
Значение разностей, м

-  ≤ 0,4
-  0,4–0,5
-  0,5–0,6
-  0,6–0,7
-  >0,7

Ошибка в вычислениях ЭВО приводит к неверному моделированию рельефа в целом, что имеет значение при анализе изменений поверхности ледника во времени. На рис. 7 показан график значения величин среднеквадратичного отклонения по всем шести элементам разности.

Для оценки распределения ошибок были построены и визуализированы в геоинформационной системе QGIS матрицы разности двух ЦМР (AKAZE – PHOTOMOD 7, AKAZE – Agisoft Metashape) (рис. 8–9). Значения представлены в метрах. Среднеквадратичное отклонение матрицы разности высот для AKAZE – PHOTOMOD 7 составило 0,43 м, а для AKAZE – Agisoft Metashape – 0,36 м.

Хотя среднеквадратичное отклонение двух разниц сопоставимо, характер распределения ошибок разный. На рис. 6 можно видеть линейные структуры, повторяющие межмаршрутное перекрытие, что является прямым следствием ошибок уравнивания при нехватке связующих точек. На рис. 9 максимальные ошибки распределены по краям трещин, отчасти это связано еще и с разностью алгоритмов построения ЦМР.

Дополнительно для наглядности были построены профили для двух матриц разности высот (рис. 10–11).

При сравнении матриц выявляются систематические ошибки. Во-первых, ЦМР на основе алгоритма AKAZE в целом выше остальных, потому что все расхождения имеют положительное значение. Во-вторых, ЦМР на основе алгоритма PHOTOMOD 7 имеет наклон относительно ЦМР на основе алгоритма AKAZE. Причиной этой ошибки может быть разница не только в ЭВО, но и в параметрах внутреннего ориентирования (дисторсия объектива), которые уточняются в результате фототриангуляции с самокалибровкой [11]. При сравнении ЦМР на основе алгоритмов Agisoft Metashape и AKAZE основные ошибки сосредоточены по краям трещин, что отчасти определяется разностью алгоритмов построения ЦМР в программных комплексах PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape [10].

Рис. 10 ⌵

Профиль матриц разности высот AKAZE — PHOTOMOD 7

Fig. 10

AKAZE - PHOTOMOD 7 difference matrix profile

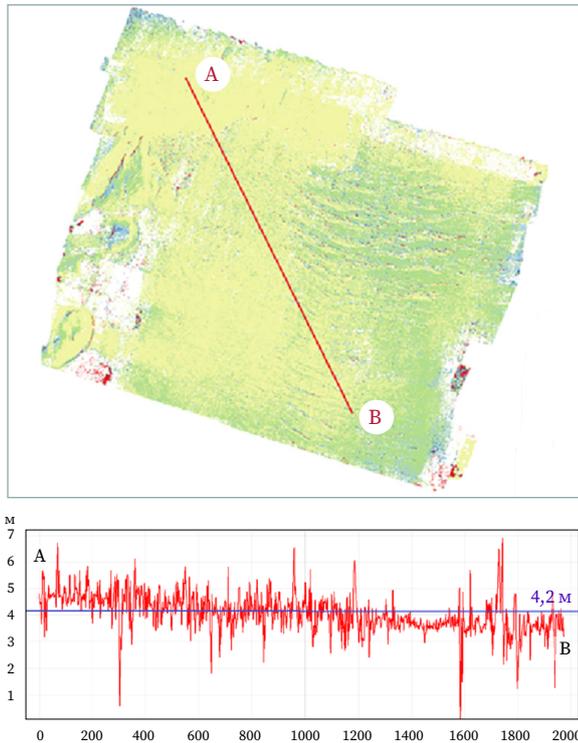
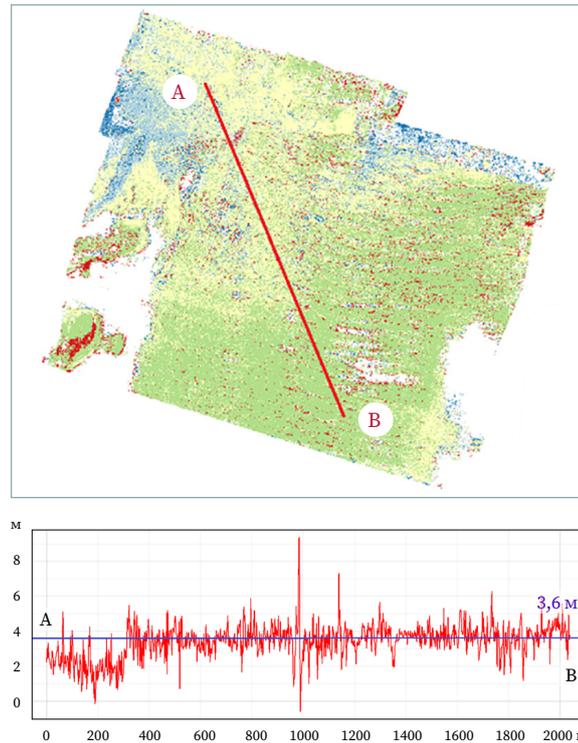


Рис. 11 ⌵

Профиль матриц разности высот AKAZE — Agisoft Metashape

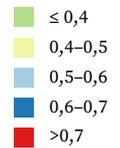
Fig. 11

AKAZE - Agisoft Metashape difference matrix profile



Условные обозначения

Значение разностей, м



4 Выводы

Результаты исследования демонстрируют существенную зависимость точности воспроизведения рельефа от качества выполненной фототриангуляции, причем определяющим фактором выступает алгоритм нахождения связующих точек. Особенности ледяной поверхности как объекта съемки создают значительные трудности при автоматическом отождествлении характерных точек, что подтверждается существенным расхождением в количестве и распределении связующих точек, полученных в двух программных комплексах. Данное несоответствие повлекло за собой различия в вычислении элементов внешнего и внутреннего ориентирования, что в итоге привело к различию в построении ЦМР.

Алгоритм AKAZE продемонстрировал лучший результат в расхождении на связующих точках, а также в их распределении по полю снимков. В результате практически для всех снимков удалось получить ЭВО и построить ЦМР, тогда как с помощью стандартных программ получались фотограмметрические разрывы (для отдельных снимков не определены ЭВО) из-за отсутствия или малого числа и плохого расположения связующих точек.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Kääh A., Huggel C., Fischer L., et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview // Natural Hazards and Earth System Science. 2005. Vol. 5(4). P. 527–554. DOI:10.5194/nhess-5-527-2005.
2. Paul F., Bolch T., Kääh A., et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 162. P. 408–426. DOI:10.1016/j.rse.2013.07.043.
3. Bhardwaj A., Sam L., Akanksha, et al. UAVs as a remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 175. P. 196–204. DOI:10.1016/j.rse.2015.12.029.

4. Скрыпицына Т.Н., Захаров В.Г., Киселева А.С. и др. Эволюция рельефа выводного ледника Долк (залив Прюдс, Восточная Антарктида) по данным беспилотных аэрофотосъемок 2017–2019 годов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 5. С. 517–528. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528.
5. Казаков Э.Э., Волков В.А., Демчев Д.М. Система оперативного мониторинга морского льда в Арктике, основанная на открытых спутниковых радиолокационных данных // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». СПб.: Политехника, 2017. С. 33–39.
6. Нефедова О.А., Чибуничев А.Г., Журкин И.Г. Исследование алгоритмов автоматического нахождения и измерения связующих точек на снимках ледника, полученных с БВС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68, № 5. С. 31–43. DOI:10.30533/GiA-2024-037.
7. Tareen S.A.K., Saleem Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK // International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). Sukkur: IEEE, 2018. P. 1–10. DOI:10.1109/ICOMET.2018.8346440.
8. Yang X., Cheng K.T. LDB: An ultra-fast feature for scalable augmented reality // IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Atlanta: IEEE, 2012. P. 49–57. DOI:10.1109/ISMAR.2012.6402537.
9. Kalms L., Khaled M., Gzhringer D. Accelerated Embedded AKAZE Feature Detection Algorithm on FPGA // HEART'17: Proceedings of the 8th International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies. New York: ACM, 2017. P. 10. DOI:10.1145/3120895.3120898.
10. Смирнов А.В., Скрыпицына Т.Н., Зубков С.А. Особенности фотограмметрической обработки съемки айсбергов, полученной с беспилотного воздушного судна // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66, № 3. С. 42–59. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-3-42-59.
11. James M.R., Antoniazza G., Robson S., et al. Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection: accuracy, precision and considerations beyond off-nadir imagery // Earth Surface Processes and Landforms. 2020. Vol. 45. Is. 10. P. 2251–2271. DOI:10.1002/esp.4878.

АВТОР Нефедова Ольга Александровна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра фотограмметрии, факультет геодезии
 0009-0005-6240-8014

Поступила 23.03.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



A Study of the Algorithm for Automatically Finding and Measuring AKAZE Connection Points in Glacier Images Taken from the Unmanned Aerial Vehicle

Olga A. Nefedova¹ 

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 o.nefedova2011@yandex.ru

CITATION Nefedova OA. A Study of the Algorithm for Automatically Finding and Measuring AKAZE Connection Points in Glacier Images Taken from the Unmanned Aerial Vehicle. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-036.

KEYWORDS unmanned aerial photography, aerial photographs of the glacier, connecting points, detector, descriptor, phototriangulation, digital terrain model

ABSTRACT This work is aimed at investigating the effectiveness of the adapted AKAZE algorithm for processing images of the surface of glaciers, which have a complex structure due to the variety of textures, cracks and variability of lighting conditions. Glacial surfaces pose a challenge to traditional image processing methods, as the qualities of the connecting points can vary significantly depending on the environment. In the study, preliminary image processing was carried out, which made it possible to increase the accuracy of finding the connecting points necessary for accurate modeling. Using the Python programming language, the AKAZE algorithm was implemented to find and measure connecting points in images. The images were then transferred to the PHOTOMOD 7 software package, where several subsequent processing steps were carried out to create a digital relief model. A full cycle of processing of the same block was also performed using internal algorithms in the PHOTOMOD 7 and Agisoft Metashape software package to compare results and evaluate quality. A comparative analysis of the obtained elevation matrices demonstrated the effectiveness of the AKAZE algorithm in the context of processing complex glacial surfaces. The results of the study highlight its potential in geoinformation tasks and open up new horizons for further research in the field of photogrammetry and monitoring of natural objects.

REFERENCES 1. Kääh A, Huggel C, Fischer L, et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2005;5(4): 527–554. DOI:10.5194/nhess-5-527-2005.

2. Paul F, Bolch T, Kääb A, et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products. *Remote Sensing of Environment*. 2015;162: 408–426. DOI:10.1016/j.rse.2013.07.043.
3. Bhardwaj A, Sam L, Akanksha, et al. UAVs as a remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*. 2016;175: 196–204. DOI:10.1016/j.rse.2015.12.029.
4. Skrypitsyna TN, Zakharov VG, Kiseleva AS, et al. Evoljucija rel'efa vyvodnogo lednika Dolk (zaliv Prjuds, Vostochnaja Antarktida) po dannym bespilotnyh ajerofotos'emok 2017–2019 godov [Evolution of the relief of the Dolk outlet glacier (Prudes Bay, East Antarctica) according to unmanned aerial photographs from 2017–2019]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(5): 517–528. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528.
5. Kazakov EE, Volkov VA, Demchev DM. Sistema operativnogo monitoringa morskogo l'da v Arktike, osnovannaja na otkrytyh sputnikovyh radiolokacionnyh dannyh [An operational monitoring system for sea ice in the Arctic based on open satellite radar data]. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastre. From Idea to Application"*. St. Petersburg: Politehnika; 2017: 33–39. (In Russian).
6. Nefedova OA, Chibunichev AG, Zhurkin IG. Issledovanie algoritmov avtomaticheskogo nahozhdenija i izmerenija svjazujuvih toček na snimkah lednika, poluchennyh s BVS [Study of algorithms for automatic detection and measurement of tie points in glacier images obtained from UAVs]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(5): 31–43. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-037.
7. Tareen SAK, Saleem Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK. *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. Sukkur: IEEE, 2018: 1–10. DOI:10.1109/ICOMET.2018.8346440.
8. Yang X, Cheng KT. LDB: An ultra-fast feature for scalable augmented reality. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Atlanta: IEEE; 2012: 49–57. DOI:10.1109/ISMAR.2012.6402537.
9. Kalms L, Khaled M, Gzhringer D. Accelerated Embedded AKAZE Feature Detection Algorithm on FPGA. *HEART'17: Proceedings of the 8th International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies*. New York: ACM; 2017: 10. DOI:10.1145/3120895.3120898.
10. Smirnov AV, Skrypitsyna TN, Zubkov SA. Osobennosti fotogrammetricheskoy obrabotki s'emki ajsbergov, poluchennoj s bespilotnogo vozdušnogo sudna [Features of photogrammetric processing of iceberg surveys obtained from an unmanned aircraft]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(3): 42–59. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-3-42-59.
11. James MR, Antoniazza G, Robson S, et al. Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection: accuracy, precision and considerations beyond off-nadir imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020;45(10): 2251–2271. DOI:10.1002/esp.4878.

AUTHOR Olga A. Nefedova

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Photogrammetry, Faculty of Geodesy

 0009-0005-6240-8014

Submitted: March 23, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Об определении направляющих косинусов вектора луча визирования в системах координат различных камер (сенсоров)

Е.В. Козин¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

ekozin1970@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Козин Е.В. Об определении направляющих косинусов вектора луча визирования в системах координат различных камер (сенсоров) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 46–53. DOI:10.30533/GiA-2025-051.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА стереосъемка, изображение, камера, координата, луч визирования

АННОТАЦИЯ Для определения высот точек местности наиболее приемлемым является метод конвергентной съемки, когда вектор луча визирования наклонен под углом от надира. Точность измерений имеет свой максимум при пересечении оптических осей зон обзора под прямым углом. Стереосъемка включает три основные составляющие: регистрацию лучей камерой (сенсором, сканером), движение центра масс носителя и изменение его углового положения. Направление вектора луча визирования в системе координат аппаратуры наблюдения задают направляющие косинусы вектора луча визирования, для определения которых в системах координат различных камер (сенсоров), как правило, применяются аналитические фотограмметрические и стереофотограмметрические методы. Кроме того, необходимо учитывать, что для определения направляющих косинусов вектора луча визирования в системе координат различных по геометрии построения изображений камер (сенсоров) требуется знать способ и закон сканирования (съемки), применяемые в конкретной системе наблюдения. В современных системах наблюдения наиболее часто используется метод равномерного поэлементного сканирования в плоскости, перпендикулярной направлению полета носителя аппаратуры наблюдения. В данной статье предлагается краткий анализ определения угловых величин (направляющих косинусов) в системах координат кадровой, панорамной, щелевой и оптико-механической камер.

1 Введение

Высоты точек местности целесообразнее определять с помощью метода конвергентной съемки, когда вектор луча визирования наклонен под углом от надира. Точность измерений имеет свой максимум при пересечении оптических осей зон обзора под прямым углом. Увеличение наклона осей визирования ведет к увеличению базиса стереосъемки, возрастанию искажений, а как следствие, к потере качества (измерение пространственного разрешения пикселя на местности, определение пограничной нерезкости и частотно-контрастной характеристики объектива) изображений и их разномасштабности.

Известно, что для полного определения положения точки местности данных только одного снимка недостаточно. Три координаты точки местности можно найти, если она изобразилась на двух снимках, полученных с различных точек съемки (наблюдения). Стереосъемка включает три основные составляющие: регистрацию лучей сенсором (камерой), движение центра масс носителя и изменение его углового положения^{1,2,3,4} [1–4].

Направление вектора луча визирования в системе координат аппаратуры наблюдения задают величины, определяющие положение данного вектора. Этими величинами являются направляющие косинусы вектора луча визирования.

Для определения направляющих косинусов (c, d, l) вектора \vec{r} луча визирования в системе координат камеры (сенсора) $SXYZ$ необходимо знать способ и закон сканирования, применяемые в конкретной системе наблюдения⁵ [5–7]. В данной статье предлагается краткий анализ определения угловых величин (направляющих косинусов) в системах координат различных по геометрии построения изображений камер (сенсоров).

2 Материалы и методы

Для определения направляющих косинусов луча визирования в системах координат различных камер (сенсоров), как правило, применяются аналитические фотограмметрические и стереофотограмметрические методы. При этом используются математические преобразования между различными системами координат (например, системой координат снимка и внешней ориентацией) для точного расчета пространственных параметров.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Ориентация вектора луча визирования в системе координат кадровой камеры

Положение луча визирования для каждой точки снимка в системе координат кадровой камеры определяется сферическими координатами α_k и β_k (рис. 1) из следующих выражений:

-
- 1 Родионов Б.Н. Динамическая фотограмметрия. М.: Недра, 1983. 311 с.
 - 2 Тюфлин Ю.С. Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутников. М.: Недра, 1986. 271 с.
 - 3 Урмаев М.С. Орбитальные методы космической геодезии. М.: Недра, 1981. 256 с.
 - 4 Владимиров В.М., Дмитриев Д.Д., Дубровская О.А. и др. Дистанционное зондирование Земли: учеб. пособие / под ред. В.М. Владимирова. М.: ИНФРА-М; Красноярск: СФУ, 2017. 196 с.
 - 5 Исмаил Е.Е. Данные дистанционного зондирования Земли. Принципы и критерии оценки качества. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 116 с.

1 \odot
$$\alpha_k = \arctg \frac{x-x_0}{f_k},$$

2 \odot
$$\beta_k = \arctg \frac{(y-y_0)\cos\alpha_k}{f_k},$$

где x и y — плоские прямоугольные координаты точки на кадровом изображении;

x_0, y_0, f_k — элементы внутреннего ориентирования кадровой камеры (f_k — фокусное расстояние кадровой камеры; x_0, y_0 — координаты главной точки изображения).

Пусть \vec{r}_k — вектор, составляющими которого являются направляющие косинусы луча визирования в системе координат кадровой камеры. Для определения его составляющих воспользуемся выражением

3 \odot
$$\vec{r}_k = A_{\alpha_k} A_{\beta_k} \vec{r}^e,$$

где \vec{r}^e — единичный вектор-столбец оптической оси в системе координат кадровой камеры;

$A_{\alpha_k}, A_{\beta_k}$ — известные матрицы поворота на сферические углы α_k, β_k :

4 \odot
$$A_{\alpha_k} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{bmatrix},$$

$$A_{\beta_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix}.$$

В результате преобразований

5 \odot
$$\vec{r}_k = \begin{pmatrix} c \\ d \\ l \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & -\sin \alpha_k \sin \beta_k & -\sin \alpha_k \cos \beta_k \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ \sin \alpha_k & \cos \alpha_k \sin \beta_k & \cos \alpha_k \cos \beta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_k \sin \alpha_k \\ \sin \beta_k \\ -\cos \alpha_k \cos \beta_k \end{bmatrix}$$

выражение определения направляющих косинусов в системе координат кадровой камеры принимает следующий вид:

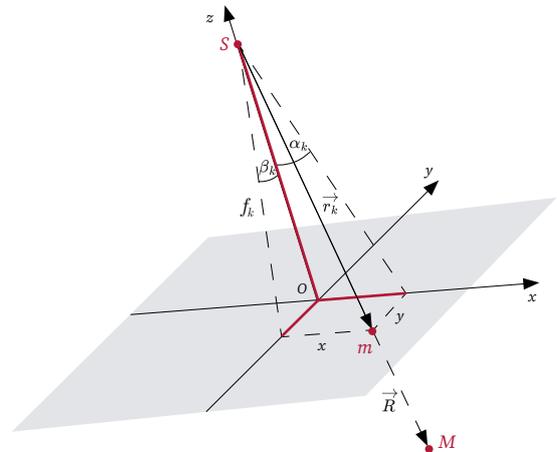
6 \odot
$$\vec{r}_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k \sin \alpha_k \\ \sin \beta_k \\ -\cos \alpha_k \cos \beta_k \end{bmatrix}.$$

Рис. 1 \odot

Положение луча визирования в системе координат кадровой камеры

Fig. 1

Position of the sighting beam in the coordinate system of the frame camera



3.2 Ориентация вектора луча визирования в системе координат панорамной камеры

Положение луча визирования для каждой точки снимка в системе координат панорамной камеры определяется сферическими координатами α_p и β_p (рис. 2) из выражений

7 \odot
$$\alpha_p = \arctg \frac{x-x_0}{f_p},$$

8 \odot
$$\beta_p = \arctg \frac{y-y_0}{f_p},$$

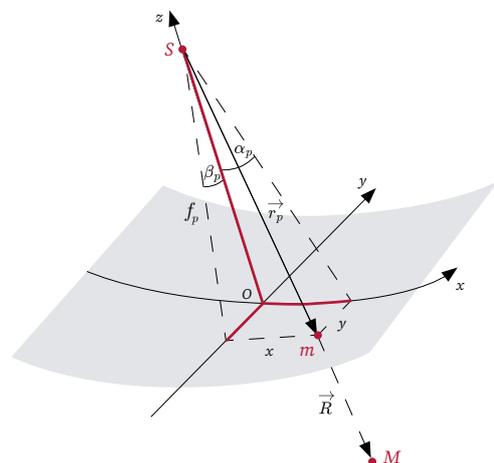
где x и y — плоские прямоугольные координаты точки на панорамном изображении;

Рис. 2 \odot

Положение луча визирования в системе координат панорамной камеры

Fig. 2

Position of the sighting beam in the coordinate system of the panoramic camera



x_0, y_0, f_p — элементы внутреннего ориентирования панорамной камеры (f_p — фокусное расстояние панорамной камеры; x_0, y_0 — координаты главной точки изображения).

Пусть \vec{r}_p — вектор, составляющими которого являются направляющие косинусы луча визирования в системе координат панорамной камеры. Для определения его составляющих воспользуемся выражением

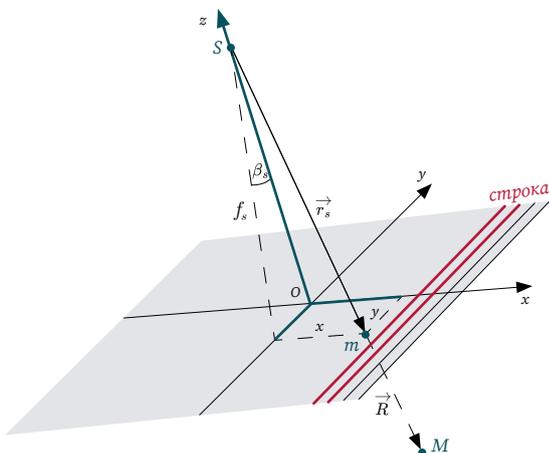
9 \blacktriangleright
$$\vec{r}_p = A_{\alpha_p} A_{\beta_p} \vec{r}^e,$$

где $A_{\alpha_p}, A_{\beta_p}$ — известные матрицы поворота на сферические углы α_p, β_p ; \vec{r}^e — единичный вектор-столбец луча визирования в системе координат панорамной камеры.

10 \blacktriangleright
$$\vec{r}_p = \begin{pmatrix} c \\ d \\ l \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_p & 0 & -\sin \alpha_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_p & 0 & \cos \alpha_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_p & -\sin \beta_p \\ 0 & \sin \beta_p & \cos \beta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_p & -\sin \alpha_p \sin \beta_p & -\sin \alpha_p \cos \beta_p \\ 0 & \cos \beta_p & -\sin \beta_p \\ \sin \alpha_p & \cos \alpha_p \sin \beta_p & \cos \alpha_p \cos \beta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \sin \beta_p \\ -\cos \alpha_p \cos \beta_p \end{bmatrix}.$$

3.3 Ориентация вектора луча визирования в системе координат щелевой камеры

Рис. 3 \blacktriangledown
 Положение луча визирования в системе координат щелевой камеры
 Fig. 3
 Position of the sighting beam in the coordinate system of the slit camera



При щелевой съемке положение луча визирования в системе координат камеры в момент времени t определяется углом β_s (рис. 3). Одному моменту времени t будут соответствовать все точки, расположенные на одной строке изображения, определяемой из выражения

11 \blacktriangleright
$$\beta_s = \arctg \frac{y-y_0}{f_s},$$

где x и y — плоские прямоугольные координаты точки на щелевом изображении;

x_0, y_0, f_s — элементы внутреннего ориентирования щелевой камеры (f_s — фокусное расстояние щелевой камеры; x_0, y_0 — координаты главной точки изображения).

Для определения направляющих косинусов в системе координат щелевой камеры воспользуемся следующими отношениями:

12 \blacktriangleright
$$\vec{r}_s = A_{\beta_s} \vec{r}^e,$$

где \vec{r}^e — единичный вектор-столбец луча визирования в системе координат щелевой камеры;

A_{β_s} — известная матрица поворота на сферический угол β_s , определяющий текущее положение сканирующего луча \vec{r}_s в момент времени t в системе координат щелевой камеры:

13 \blacktriangleright
$$A_{\beta_s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_s & -\sin \beta_s \\ 0 & \sin \beta_s & \cos \beta_s \end{bmatrix}.$$

Тогда направляющие косинусы луча визирования в системе координат щелевой камеры определяются следующим образом:

14 \blacktriangleright
$$\vec{r}_s = \begin{pmatrix} c \\ d \\ l \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_s & -\sin \beta_s \\ 0 & \sin \beta_s & \cos \beta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \beta_s \\ -\cos \beta_s \end{bmatrix}.$$

3.4 Ориентация вектора луча визирования в системе координат оптико-механической камеры

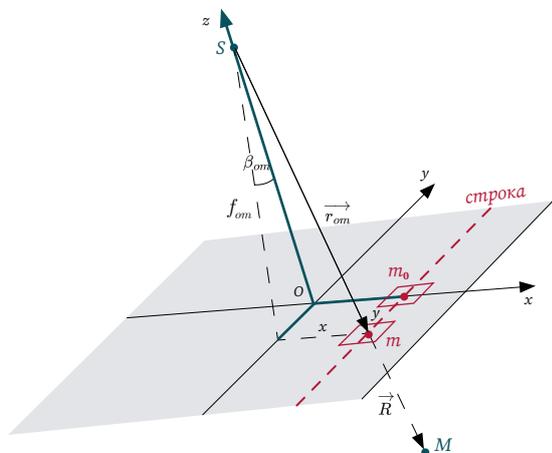
В настоящее время в системах наблюдения наиболее часто применяется равномерное сканирование в плоскости, перпендикулярной направлению полета носителя. При оптико-механической съемке положение луча визирования для каждой точки снимка в системе координат камеры в момент времени t определяется углом β_{om} (рис. 4).

Рис. 4 

Положение луча визирования в системе координат оптико-механической камеры

Fig. 4

Position of the sighting beam in the coordinate system of the optical-mechanical camera



Одному моменту времени t будут соответствовать один элемент (точка), определяемый из выражения

15 
$$\beta_{om} = \Delta\beta(m - m_0)$$

16  или
$$\beta_{om} = \Delta\beta\left(\tau - \frac{\tau_0}{2}\right)2 \frac{m_0}{\tau_0},$$

где $\Delta\beta$ — изменение угла отклонения сканирующего зеркала между двумя последовательными элементами (опросами) строки сканирования; τ_0 — время рабочего хода ($\tau \leq \tau_0$); m_0 — номер центрального элемента в строке, соответствующий нулевому углу поворота зеркала ($\beta_0 = 0$) и времени $\tau_0/2$.

Для определения направляющих косинусов в системе координат камеры воспользуемся следующими аналогичными отношениями:

17 
$$\vec{r}_{om} = A_{\beta_{om}} \vec{r}^e,$$

где \vec{r}^e — единичный вектор-столбец луча визирования в системе координат оптико-механической камеры;

$A_{\beta_{om}}$ — известная матрица поворота на сферический угол β_{om} , определяющий текущее положение сканирующего луча \vec{r}_{om} в момент времени t в системе координат камеры.

В результате направляющие косинусы луча визирования в системе координат оптико-механической камеры определяются^{6,7,8} [8–10] следующим образом:

18 
$$\vec{r}_{om} = \begin{pmatrix} c \\ d \\ l \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_{om} & -\sin \beta_{om} \\ 0 & \sin \beta_{om} & \cos \beta_{om} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \beta_{om} \\ -\cos \beta_{om} \end{bmatrix}.$$

4 Выводы

Таким образом, хотя аналитические выражения имеют схожий вид, их различие состоит в определении угловых координат точек (объектов), изображенных на разнородных снимках. Кроме того, для вычисления направляющих косинусов, определяющих положение вектора луча визирования в системе координат камеры, необходимо знать способ и закон сканирования (съемки), применяемый в конкретной системе наблюдения. В настоящее время в системах наблюдения наиболее часто применяется метод равномерного поэлементного сканирования в плоскости, перпендикулярной направлению полета носителя.

6 Лобанов А.Н. Фотограмметрия: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 552 с.

7 Лобанов А.Н., Журкин И.Г. Автоматизация фотограмметрических процессов. М.: Недра, 1980. 240 с.

8 Щербаков В.Л. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании: учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 136 с.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Баушев С.В., Гнусарев Н.В., Козин Е.В. Угломерный орбитальный метод определения геодезических координат точек местности // Информация и космос. 2007. № 4. С. 32–39.
2. Гудиев Д.М., Исламов А.Р. Аэрофотосъемка. Способы повышения качества и скорости геодезических изысканий // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 27–28 ноября 2024 г. Екатеринбург: УрГУПС, 2025. Вып. 1(263). С. 202–205.
3. Ипатова Л.П., Хрущ Р.М. Автоматическая идентификация одноименных областей и точек стереопары фотоснимков // Геодезия и картография. 2001. № 6. С. 22–24.
4. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли: монография. М.: СканЭкс: А и Б, 2002. 295 с.

5. Хрущ Р.М. Этапы становления и развития фотограмметрии в России // Геодезия и картография. 2003. № 7. С. 50–61.
6. Сквасников М.А., Алтухов А.И., Дудин Е.А. и др. Решение задач экологического мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Метеорологический вестник. 2013. Т. 5, № 2. С. 16–22.
7. Тарелкин Е.П. Новая парадигма в картографии и ее влияние на образование // Информация и космос. 2005. № 1. С. 58–60.
8. Белоглазов И.Н., Казарин С.Н., Косьянчук В.В. Обработка информации в иконических системах навигации, наведения и дистанционного зондирования местности: монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 367 с.
9. Титаров П.С. Фотограмметрическая обработка спутниковых сканерных стереопар // Геодезия и картография. 2001. № 8. С. 30–34.
10. Зуев Ю.С., Решетнева Т.Г., Таченков А.А. Применение методов дистанционного зондирования в геоинформатике (на примере снимков камеры Aster) // Информатика и системы управления. 2003. № 1(5). С. 57–65.

АВТОР Козин Евгений Вячеславович

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия
кафедра инженерной геодезии, факультет транспортного строительства
канд. техн. наук, доцент
 0000-0001-7552-275X

Поступила 28.04.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



On the Determination of the Direction Cosines of the Sighting Beam Vector in the Coordinate Systems of Various Cameras (Sensors)

Evgeny V. Kozin ¹

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering,
St. Petersburg, Russia

ekozin1970@mail.ru

CITATION Kozin EV. On the Determination of the Direction Cosines of the Sighting Beam Vector in the Coordinate Systems of Various Cameras (Sensors). *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 46–53. DOI:10.30533/GiA-2025-051.

KEYWORDS stereo, image, camera, coordinate, line of sight

ABSTRACT For determining the elevations of terrain points, the most suitable method is convergent surveying, where the sighting beam vector is inclined at an angle from the nadir. Measurement accuracy is maximized when the optical axes of the survey zones intersect at a right angle. Stereoscopic surveying involves three main components: beam recording by a camera (sensor, scanner), the movement of the carrier's center of mass, and changes in its angular position. The direction of the sighting beam vector in the coordinate system of the surveillance equipment is determined by the quantities defining the position of this vector. These quantities are the direction cosines of the sighting beam vector. To determine the direction cosines of the sighting beam in the coordinate systems of different cameras (sensors), analytical photogrammetric and stereophotogrammetric methods are typically used. Furthermore, it is important to consider that determining the direction cosines of the sighting beam vector in the coordinate system of cameras (sensors) with different imaging geometries requires knowledge of the scanning (shooting) method and law used in the specific surveillance system. Recently, the most commonly used method in modern surveillance systems is uniform element-by-element scanning in a plane perpendicular to the flight direction of the surveillance equipment carrier. This article offers a brief analysis of determining angular quantities (direction cosines) in the coordinate systems of frame, panoramic, slit, and optical-mechanical cameras.

REFERENCES 1. Baushev SV, Gнусарев NV, Kozin EV. Uglomernyj orbital'nyj metod opredelenija geodezicheskikh koordinat toček mestnosti [Goniometric orbital method

- for determining geodetic coordinates of terrain points]. *Information and Space*. 2007;4: 32–39. (In Russian).
2. Gudiev DM, Islamov AR. Ajerofotos”emka. Sposoby povyshenija kachestva i skorosti geodezicheskikh izyskanij [Aerial photography. Methods for improving the quality and speed of geodetic surveys]. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation “Railway transport and technologies”, Yekaterinburg, November 27–28, 2024*. Yekaterinburg: USURT; 2025;1(263): 202–205. (In Russian).
 3. Ipatova LP, Khrushch RM. Avtomaticheskaja identifikacija odnoimennyh oblastej i tochek stereopary fotosnimkov [Automatic identification of identical areas and points of a stereo pair of photographs]. *Geodesy and Cartography*. 2001;6: 22–24. (In Russian).
 4. Garbuk SV, Gershenzon VE. *Kosmicheskie sistemy distancionnogo zondirovanija Zemli* [Space systems of remote sensing of the Earth] [monograph]. Moscow: SkanJEks: A i B; 2002. 295 p. (In Russian).
 5. Khrushch RM. Jetapy stanovlenija i razvitija fotogrammetrii v Rossii [Stages of formation and development of photogrammetry in Russia]. *Geodesy and Cartography*. 2003;7: 50–61. (In Russian).
 6. Skvaznikov MA, Altukhov AI, Dudin EA, et al. Reshenie zadach jekologicheskogo monitoringa s ispol’zovaniem dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli [Solving environmental monitoring problems using Earth remote sensing data]. *Meteorological bulletin*. 2013;5(2): 16–22. (In Russian).
 7. Tarelkin EP. Novaja paradigma v kartografii i ee vlijanie na obrazovanie [New paradigm in cartography and its impact on education]. *Information and Space*. 2005;1: 58–60. (In Russian).
 8. Beloglazov IN, Kazarin SN, Kos’janchuk VV. *Obrabotka informacii v ikonicheskikh sistemah navigacii, navedenija i distancionnogo zondirovanija mestnosti* [Information processing in iconic systems of navigation, guidance and remote sensing of terrain] [monograph]. Moscow: FIZMATLIT; 2012. 367 p. (In Russian).
 9. Titarov PS. Fotogrammetricheskaja obrabotka sputnikovyh skanernyh stereopar [Photogrammetric processing of satellite scanner stereopairs]. *Geodesy and Cartography*. 2001;8: 30–34. (In Russian).
 10. Zuev JuS, Reshetneva TG, Tachenkov AA. Primenenie metodov distancionnogo zondirovanija v geoinformatike (na primere snimkov kamery Aster) [Application of remote sensing methods in geoinformatics (on the example of the Aster camera images)]. *Information Science and Control Systems*. 2003;1(5): 57–65. (In Russian).

AUTHOR Evgeny V. Kozin

Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering,
St. Petersburg, Russia

Department of Engineering Geodesy, Faculty of Transport Construction

PhD in Engineering, Associate Professor

 0000-0001-7552-275X

Submitted: April 28, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Постановка задачи и анализ направлений прогнозирования применительно к оценке устойчивого развития территориального образования

М.А. Боярчук¹✉, И.Г. Журкин¹, П.Ю. Орлов¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

✉ 000002248@edu.miigaik.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Боярчук М.А., Журкин И.Г., Орлов П.Ю. Постановка задачи и анализ направлений прогнозирования применительно к оценке устойчивого развития территориального образования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 54–72. DOI:10.30533/GiA-2025-054.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА геоинформационный анализ, природно-ресурсный потенциал, устойчивое развитие, конечно-разностная модель, прогноз

АННОТАЦИЯ К настоящему моменту выполнено большое количество исследований в сфере прогнозирования устойчивого развития как в части отдельных составляющих, так и в масштабах целых стран, в том числе в соответствии с нормативными документами ООН. При этом не наблюдается единого мнения об используемых подходах, математическом аппарате и критериях устойчивости. В данном исследовании предпринята попытка сформулировать и формализовать задачу прогнозирования устойчивого развития, а также провести анализ накопленного опыта и выбрать наиболее подходящий метод прогноза устойчивого развития территории произвольного состава и смешанной организационной структуры. Предложены основные категории и базовые сценарии прогноза устойчивого развития. В качестве необходимой и достаточной выбрана точность прогноза в 10–20 %. Рассмотрены линейные множественные модели, панельные данные, регрессионно-дифференциальные модели (в том числе с использованием метода опорных векторов), оптимизационные математические, конечно-разностные модели, методы машинного обучения. Отмечены их достоинства и недостатки. Представлены требования к прогнозированию устойчивости развития территориального образования, а также стратегии и сценарии их развития. По итогам исследования сделан вывод, что конечно-разностная модель и искусственные нейронные сети являются наиболее перспективными из рассмотренных подходов. Однако к недостаткам применения искусственных нейронных сетей относятся необходимость экспериментального подбора структуры сети под решаемую задачу, возникновение тупиковых ситуаций при обучении и непредсказуемость результатов.

1 Введение

Эффективное управление регионами требует оценки экологического состояния, природно-ресурсной базы и социальных индикаторов, а также прогнозирования их динамики под воздействием антропогенных факторов. Реализовать это позволяет геоинформационный подход, предполагающий создание специализированной системы для пространственного анализа и моделирования устойчивого развития (УР), которая объединяет экологические, экономические и социальные данные в единую цифровую платформу, что обеспечивает наглядность, точность и обоснованность решений для органов власти. УР предполагает гармоничное сочетание экономического роста, социального благополучия и экологической устойчивости, что особенно важно в условиях растущего давления на природные ресурсы и окружающую среду, а также снижающейся экономической стабильности. При этом с понятием УР связан ряд проблем, начиная с отсутствия общепринятой его трактовки и заканчивая вопросами его формализации, оценки и прогноза. Прогнозирование УР поможет определить оптимальные способы использования природных ресурсов, минимизации негативного воздействия на окружающую среду и сохранения экологического баланса. Без точных прогнозов достижение целей ООН в области УР к 2030 году становится невозможным.

Цель данной работы — провести анализ накопленного опыта в области прогнозирования УР с тем, чтобы выбрать наиболее подходящий метод (или при необходимости синтезировать собственный) и использовать его в рамках научных исследований соответствующего направления, проводимых в настоящее время в Московском государственном университете геодезии и картографии. Актуальность данной работы обусловлена тем, что, несмотря на активное участие государственных и частных организаций, научно-исследовательских институтов и университетов, независимых исследователей и некоммерческих партнерств, освещение проблем УР в средствах массовой информации, отсутствует системный подход к прогнозу УР и комплексное рассмотрение связанных с этим вопросов. Применяются различные математические и технические подходы, затрудняющие масштабирование решений на любой уровень территории, рассматриваются частные задачи оценки и прогнозирования одной составляющей УР либо только одного частного показателя.

2 Материалы и методы

2.1 Постановка задачи

Понятие «устойчивое развитие» фактически было введено в оборот Генеральной Ассамблеей ООН в 1987 году и с тех пор широко употребляется применительно к различным сферам деятельности человечества, что, впрочем, не означает наличия единственной и общепринятой трактовки данного термина. В настоящее время природно-ресурсный подход к развитию является преобладающим. В рамках данного исследования будем придерживаться определения УР как успешного развития человеческого сообщества, осуществляющего хозяйственную деятельность, без угроз для среды обитания [1]. При этом использование слова «развитие» подразумевает, во-первых, сравнение показателей УР с их предыдущими значениями, т. к. развитие невозможно в одной точке времени, а во-вторых, увеличение хотя бы одного из показателей при неизменности (или отсутствии существенного падения) других показателей, что отражает устойчивость.

С точки зрения формализации будем рассматривать УР как совокупность показателей экологической, социальной и экономической устойчивости, составляющих вектор УР G в трехмерном аффинном пространстве:

$$G(t) = \{G_{эки}(t), G_{экл}(t), G_{соц}(t)\}.$$

При этом каждый показатель, в свою очередь, является интегральным и зависит от множества частных (дифференциальных) составляющих, в совокупности всесторонне описывающих состояние рассматриваемого субъекта в той или иной области и имеющих временной характер. Прогнозированию в такой модели подвергается каждый показатель (экономический, экологический и социальный) отдельно. Упор только на экономику либо рассмотрение только экологических вопросов противоречит самой сути УР — комплексного подхода рационального и сбалансированного использования среды обитания человека. Составляющие УР непрерывно влияют друг на друга: например, добыча полезных ископаемых для усиления экономики региона непременно приводит к загрязнению территории, нарушению почвенного и лесного покрова и впоследствии — к снижению социального благополучия. Поэтому прогнозирование УР должно учитывать взаимное влияние его составляющих. Таким образом, прогнозная задача заключается в оценке состояния всех трех составляющих УР в некотором моменте или на некотором временном отрезке в будущем по имеющимся данным на текущий момент и на некотором отрезке в прошлом, а также в оценке устойчивости этих составляющих путем сравнения с заданным порогом и в оценке их динамики.

Стоит отметить, что существует немало количество работ, направленных на прогнозирование тех или иных составляющих УР, как правило, рассматриваемых в отрыве от остальных (в частности экономической и экологической составляющих), или даже отдельных частных показателей, например численности населения. При этом математические основы прогноза в таких исследованиях часто совпадают.

Оценка и прогнозирование УР проводятся на уровне территориальных образований, которые можно условно (однако не всегда) приравнять к административно-территориальным единицам уровня области или района. В некоторых случаях может быть более обоснованным деление не по административным, а по естественным границам экосистем, ландшафтов или экономических кластеров. Стоит также отметить, что в задаче прогнозирования УР территориального образования не ставится требование к высокой точности получаемого прогноза, т. к. полученная оценка может отличаться от вычисленных показателей УР в будущем вследствие влияния внешних или неучтенных факторов, а попытка достичь максимальной точности прогноза может привести к неоправданному усложнению математической модели. Поскольку прогноз носит стратегический характер, в качестве приемлемой примем точность прогноза в 10–20 %. Дифференциальные составляющие УР, в свою очередь, желательно определять максимально точно из-за их большого количества и участия в дальнейших вычислениях, чтобы избежать значительного накопления ошибки.

Такой подход позволяет реализовать методологию, при которой для перебора значений большого числа (более сотни) частных критериев при составлении различных прогнозных сценариев возможно применить искусственный интеллект, в частности нейросетевые технологии, помогающие выбрать оптимальный план развития.

2.2 Обзор направлений прогнозирования

Для решения задачи по выявлению основных направлений прогнозирования УР региона был проведен анализ научной литературы, включающий 25 источников (отечественных и зарубежных), опубликованных в период с 1995 по 2024 год. Критериями отбора послужили релевантность тематике прогнозирования регионального развития, описание конкретных математических и инструментальных методов, а также охват различных компонент УР (экономической, социальной, экологической). Рассматривались статьи, в которых описывалось прогнозирование либо УР в целом (что встречается довольно редко), либо каких-либо его составляющих, в частности природно-ресурсного потенциала.

3 Результаты

3.1 Анализ и применимость методов прогнозирования составляющих устойчивого развития

Для прогнозирования экономических и социальных показателей регионов широко используются линейные множественные модели (ЛММ). Как показано в статье [2], ЛММ находят применение при решении таких задач, как прогнозирование безработицы в РФ в зависимости от начисленной заработной платы и доли занятых лиц, прогнозирование валового регионального продукта, случаев заражения COVID-19, потребления регионом электроэнергии. К достоинствам ЛММ можно отнести ее простоту и, как следствие, высокую распространенность, а также использование статических данных в качестве входных, к недостаткам — невысокое качество прогноза. В большинстве рассматриваемых далее научных работ отмечается, что предлагаемые в них методы дают лучший результат, чем ЛММ.

Некоторое распространение получает и моделирование на основе панельных данных, являющееся развитием регрессионных моделей [3]. Сам термин «панельные данные» появился в эконометрике и обозначает временные ряды, содержащие в себе пространственную информацию [4, 5]. В частности, существует исследование, в котором оценивается роль природных ресурсов в международной торговле и финансовом развитии территорий на основе статистического набора данных 30 стран на макроуровне. Данный метод предполагает составную структуру объекта исследования, при этом используется общий набор факторов, что не позволяет учитывать специфику конкретных субъектов хозяйствования [6]. В контексте данной работы внутреннее разделение исследуемых территориальных образований выглядит избыточным, при этом данный подход усложняет модель прогнозирования.

Другим подходом, находящим применение в прогнозировании социальных и экономических систем, является регрессионно-дифференциальная модель. При этом, как правило, используется регрессионно-дифференциальная модель второго порядка, а ряд решаемых задач включает прогнозирование индекса человеческого развития, туризма, развития горнодобывающей промышленности и т. д. Как следует из названия, регрессионно-дифференциальная модель опирается на описание моделируемого процесса при помощи дифференциальных уравнений, при этом порядок модели означает порядок уравнения. Данный подход сложен в практической реализации из-за большого количества настраиваемых параметров (часть из которых не поддается теоретическому обоснованию), а также требует использования специальных программных средств. К преимуществам такого подхода можно отнести высокое качество прогнозирования, обуславливаемое включением в модель скорости изменения моделируемых процессов во времени [2].

В случае большого числа обуславливающих факторов для построения регрессионной модели может применяться метод опорных векторов, как показано в некоторых работах [7, 8]. Данной проблеме посвящен ряд научных публикаций из Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета, в которых предлагается несколько способов получения прогноза, таких как использование конечно-разностных моделей и методов машинного обучения. При этом авторы отмечают, что большое количество работ на данную тему носит исключительно экономический характер и лишь незначительная часть исследований на русском языке была опубликована за последние 7 лет. Значимых работ в области математического моделирования природно-ресурсного потенциала (ПРП), который может быть принят за $G_{экл}$ в (1), авторский коллектив в открытом доступе не обнаружил [9].

Необходимо также отметить, что в зарубежных и отечественных источниках распространено использование оптимизационных математических моделей

для решения таких задач, как моделирование добычи природного газа [10] и других невозобновляемых природных ресурсов [11]. Однако в подобных работах зачастую рассматриваются детерминированные модели для оценки отдельных ресурсов, что не позволяет использовать данные модели напрямую. К недостаткам подобного подхода можно отнести необходимость наличия оптимизирующей функции и математической формализации исследуемого объекта, а также высокие требования к квалификации исследователей. Кроме того, оптимизационные методы могут работать некорректно при моделировании стохастических явлений, например различных экономических факторов.

Схожими недостатками обладают и методы, основанные на описании динамических систем при помощи систем дифференциальных уравнений. Как и балансные модели, такие методы плохо подходят для описания поведения сложных социально-экономических систем.

Одним из наиболее перспективных решений выглядит использование конечно-разностных моделей. Конечно-разностные модели получаются путем добавления в модель множественной линейной регрессии авторегрессионных слагаемых первого и второго порядка, позволяющих учитывать влияние прошлых значений ПРП на текущее. Порядок авторегрессионной модели определяет количество учитываемых прошлых отсчетов.

Частные показатели при этом упорядочиваются так, чтобы сумма квадратов разностей между текущим и предыдущим показателями ПРП была минимальной, что, с одной стороны, позволяет исключить субъективность при определении весовых коэффициентов, а с другой — вызывает вопрос об адекватности такого ранжирования реальности, поскольку рассматриваемый подход базируется на том, что ПРП должен быть максимально инертен. Таким образом, резкое изменение значения одного из факторов может привести к тому, что для оценки ПРП этого года он сильно потеряет в оценке важности, а значит, уменьшится и его вклад в ПРП.

В уравнение включают только существенные факторы, которые отбираются на основе анализа матрицы парных коэффициентов корреляции. При этом в модель добавляют такие объясняющие переменные, которые тесно связаны с объясняемой величиной и слабо связаны друг с другом. Возможно также построить математическую модель, используя пошаговые процедуры регрессии. В таком случае факторы добавляются в уравнение или исключаются из него до тех пор, пока увеличивается исправленный коэффициент детерминации.

С учетом авторегрессионных слагаемых первого и второго порядка величина отдельных составляющих ПРП вычисляется по формуле

2 ➤

$$Y_{расч}(t_k) = a + b \times Y(t_{k-1}) + d \times Y(t_{k-2}) + \sum_{j=1}^m c_j \times X_j(t_k),$$

где a — постоянная ЛММ, характеризующая уровень ПРП в условиях нулевых факторов;

b и d — параметры, описывающие влияние предшествующих величин ПРП;

$X_j(t_k)$ — факторы, определяющие значение ПРП;

c_j — коэффициенты ЛММ, характеризующие вклад соответствующих факторов в итоговый результат;

t_k — момент времени в пределах изучаемого временного интервала.

Такая модификация ЛММ называется конечно-разностной моделью второго порядка (КРМ-2). При этом оценка неизвестных параметров уравнений выполняется на основании модифицированного метода наименьших квадратов, сохраняющего знаки коэффициентов при факторах такими же, как в исходной линейной модели.

Для апробации предложенной модели использовались статистические данные Пермского края, включающие в себя такие факторы, как посевные площади сельскохозяйственных культур, среднегодовая численность занятых в экономике, инвестиции в основной капитал предприятий, внесение минеральных и органических удобрений, стоимость основных фондов на конец года, лесовосстановление, число предприятий и организаций на конец года, цена нефти Brent и экспорт продукции топливно-энергетического комплекса. Данные

факторы остались после исключения факторов с высокой взаимной корреляцией и использовались для прогноза таких составляющих ПРП, как добыча нефти и газа, производство удобрений и древесины, продукция сельского хозяйства. Стоит отметить, что в приведенном эксперименте набор факторов не был неизменным на всем моделируемом отрезке времени, а различался количеством и составом для интервалов с 2001 по 2008 год и с 2008 по 2018 год.

В проведенном эксперименте конечно-разностные модели превосходили в точности модель множественной линейной регрессии в 78 % случаев. Показано также, что данная модель может использоваться и для прогнозирования социально-экономических процессов [9]. Другим достоинством ЛММ и КРМ является возможность прогнозирования изменения ПРП региона в зависимости от изменения факторов. Так, уменьшение факторов среднегодовой численности занятого в экономике населения и цены нефти на 5 % из описанного выше набора статистических данных Пермского края при использовании КРМ-2 привело бы к уменьшению числовой оценки ПРП на 3,91 % в 2019 году и на 3,1 % в 2020 году [12].

Актуальность применения машинного обучения обусловлена тем, что традиционно используемые модели либо сложны в настройке, либо демонстрируют слишком плохой результат. На текущий момент методы машинного обучения успешно применяются некоторыми исследователями для таких задач прогнозирования частных составляющих ПРП, как оценка совокупности водных запасов в бассейне реки Тебриз (Иран) [13], прогнозирование урожаев различных видов зерновых, добычи нефти и т. д. Рассматриваются и вопросы экологической оценки: так, в работе [14] выполнялось исследование качества воздуха городских территорий Индии и прогнозирование его параметров с помощью сверточной нейронной сети. Не остаются без внимания и глобальные проблемы УР. В работе [15] перед авторами стояла задача прогнозирования достижения показателей ООН по УР регионов и отдельных стран к 2030 году с помощью модели ARIMAX и линейной регрессионной модели, сглаженной посредством модели Хольта — Винтерса. Однако не было обнаружено исследований, направленных на применение инструментов машинного обучения для прогнозирования ПРП территориального образования в целом [16]. Так, в исследовании [17] авторы использовали стандартные инструменты пакета Statistica 12, а именно экстраполяцию по логарифмической и степенной функции, полиному второй степени, и некий нейросетевой прогноз (суть которого, включая архитектуру модели, осталась нераскрытой) для прогнозирования динамики численности населения, продолжительности жизни, безработицы, среднедушевого дохода, валового регионального продукта на душу населения, объема сброса неочищенных сточных вод на душу населения. В качестве тестового региона для исследования выступила Ленинградская область, а исходными данными для расчетов стали социально-экономические показатели из сборников Росстата «Регионы России» за 2000–2018 годы.

В работе [16] были рассмотрены несколько алгоритмов машинного обучения, относящихся к линейным, нелинейным, ансамблевым и нейросетевым. В качестве конкретных представителей данных групп были выбраны множественная линейная регрессия, дерево принятия решений, случайный лес, градиентный бустинг и многослойный персептрон. Данные для расчетов использовались те же, что и в работе [9]. Реализация отобранных алгоритмов была проведена в среде Jupiter Notebook 6.1.4 средствами Python 3.8.5 и библиотеки scikit-learn 0.23.2. В качестве критериев сравнения результатов использовались коэффициент детерминации, квадратный корень из средней квадратической ошибки моделирования, средняя абсолютная ошибка моделирования и относительная погрешность прогнозирования на валидационной выборке.

В проведенных исследованиях показано, что нелинейные модели машинного обучения демонстрируют лучшие аппроксимационные и прогностические свойства по сравнению со множественной линейной регрессией для задачи прогнозирования показателя природно-ресурсного потенциала. По большинству критериев лидируют методы дерева решений и градиентного бустинга. Модель многослойного персептрона в среднем уступает другим алгоритмам,

по не так сильно, как линейная регрессия, показавшая худший результат по всем критериям, при этом ее средняя квадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка и относительная погрешность прогнозирования хуже на порядок.

Стоит отметить, что к недостаткам искусственных нейронных сетей (ИНС) относятся необходимость экспериментального подбора структуры сети под решаемую задачу, возникновение тупиковых ситуаций при обучении и непредсказуемость результатов. Подход к проектированию и обучению ИНС может оказывать значительное влияние на результат.

Существуют и работы, пытающиеся спрогнозировать развитие региона с использованием различных спорных с научной точки зрения понятий, таких как «плотность времени развития региона», «скорость и ускорение развития региона». Авторы утверждают, что в информационном обществе плотность времени меняется в зависимости от информационно-синергетических потоков (ИСП). При этом поток крайне неконкретно определяется как «любая интересующая исследователя информация, получаемая регионом» [18, с. 9], что оставляет большое поле для влияния субъективности исследователя.

Вектор направления развития региона и устойчивость в выбранной области (оба понятия рассматриваются в пространстве предлагаемой авторами модели) определяются отношением G величины выходящего в единицу времени ИСП (B) к разности максимального выходящего ИСП (B_{max}) и текущего:

$$3 \quad \blacktriangleright \quad G = \frac{B}{B_{max} - B}.$$

Значение $G = 0,62$ определяет устойчивое положение, соответствующее величине золотого сечения. Значение $G > 0,62$ говорит о разнородности и ослаблении связей между рассмотренными субъектами региона, т. е. о дисгармонии. $G < 0,62$ характеризует большую однородность, бедность в разнообразии продукции [18].

Ссылаясь на некоторые проведенные (но не приведенные) расчеты, авторы делают вывод о том, что развитие региона становится устойчивым при выполнении соотношения

$$4 \quad \blacktriangleright \quad T_r = 0,38T_{max},$$

где T_{max} — максимальное значение времени для производства продукции;
 T_r — гармоническое значение времени для УР при производстве продукции.

Из выражения (4) делается вывод, что «инновационные усовершенствования и модернизация при устойчивом развитии региона происходят непрерывно с рентабельностью 38 % от максимального значения по времени» [18, с. 9].

Вводится также коэффициент развития региона $K(t)$:

$$5 \quad \blacktriangleright \quad K(t) = \left(1 + t \times \frac{A-B}{C}\right)^{\left|\frac{B}{A-B}\right|},$$

где A — входящий информационно-энергетический поток в единицу времени в регионе;

B — выходящий из региона информационно-синергетический поток в единицу времени;

C — имеющийся в регионе информационно-синергетический поток;

t — данное время.

Как отмечено в заключении работы, коэффициент развития может быть найден лишь по четырем указанным выше параметрам, не включая в явном виде заявленные плотность и ускорение времени. Каких-либо конкретных примеров расчетов устойчивости развития того или иного региона в статье [18] не приводится. Кроме того, методика количественной оценки информационных потоков региона также неясна. Можно предположить, что в основе исследования, указанного выше, лежит работа [19], содержащая аппарат расчета эргатического капитала социумов и индексов социоприродного развития в рамках энергоинформационной модели, однако и в этой монографии не рассмотрены вопросы прогнозирования составляющих УР, а расчет безразмерных синтетических

индексов развития российских регионов выполнялся на доступных на тот момент данных с учетом поправочных коэффициентов неясного происхождения.

Некоторые исследователи отмечают, что использование экстраполяции временных рядов (трендов) не позволяет создать модель, адекватно описывающую будущее, особенно с учетом ненаблюдаемых внешних возмущений. Другим недостатком полиномиальных моделей является неспособность рассчитывать асимптотические приближения критерия, наблюдаемые в реальности [20].

Имеется ограниченная информация о создании автоматизированной системы регионального экологического прогноза, которая позволяет оценить изменения в состоянии растительного покрова (включая леса и сельскохозяйственные культуры), почвы, грунтовых вод (их запасы и качество), гидрологической сети и уровня загрязнения природно-территориальных комплексов площадью от 50 до 5000 км². В системе учитываются различные виды загрязнений (промышленными отходами, пестицидами, радионуклидами и другими веществами), вырубка лесов, изменение земельного фонда, использование удобрений, орошение, посадка деревьев, выпас скота, забор воды, дренаж, мелиоративные работы, а также изменения в гидрологической сети, вызванные инженерной деятельностью, межрегиональные воздействия и тенденции в климатических и погодных условиях. Система позволяет прогнозировать состояние возобновляемых ресурсов на срок от 3 до 60 лет и анализировать прошлые изменения. Она отслеживает динамику более чем трехсот параметров, характеризующих окружающую среду.

Система получила сертификацию от государственных органов управления, рекомендована к использованию и активно применяется для решения практических задач. В частности, заявлено ее применение при экологическом обосновании стратегии развития земледелия в Центральном Черноземье на уровне региона (Россия), а также в комплексном прогнозировании последствий аварии на Чернобыльской АЭС для сельского, водного и лесного хозяйства в загрязненных регионах (Беларусь). Кроме того, систему используют для оценки воздействия орошаемого земледелия в бассейне Арала на окружающую среду (Туркменистан)¹.

В работе [21] предложен алгоритм прогнозирования комплексной оценки устойчивости пространственно-динамического развития территорий, состоящий из восьми больших стадий, включающих постановочную, априорную, информационную, спецификацию прогностической модели, идентификацию, верификацию, экстраполяцию рейтингов достигнутого уровня развития и, наконец, интерпретацию результатов и разработку рекомендаций по повышению устойчивости развития региона. Алгоритм описан обобщенно, в частности в нем не содержится конкретных указаний по выбору той или иной модели прогнозирования, при этом данный шаг в него включен.

Авторы выдвигают следующие требования к прогнозированию устойчивости развития территориального образования:

- прогнозы должны быть научно обоснованы с учетом законов и закономерностей социально-экономического развития экономики, особенно законов цикличности;
- показатели устойчивости должны соответствовать определенным требованиям: прогнозы должны составляться заранее, необходимо выявлять тенденции, которые проявляются в отдельных отраслях и регионах при изменении техники, технологий, организации производства, обмена, распределения и потребления;
- при разработке прогнозов следует использовать прогностические модели, учитывающие множество факторов, влияющих на общие условия УР макрорегиона [21].

¹ Хомяков Д.М. Имитационное моделирование влияния абиотических факторов на гео- и агроэкосистемы для экологической экспертизы и управления продуктивностью земледелия: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1995. 42 с.

Для выполнения прогноза используется специализированное проприетарное программное обеспечение IBM SPSS Statistics v.20. Описанный алгоритм сочетает в себе применение сценарного прогнозирования, а также трендового и корреляционно-регрессионного анализа, предполагая при этом прогнозирование сразу трех сценариев — пессимистического, инерционного и оптимистического. Первый из них подразумевает небольшое уменьшение или даже сохранение текущей динамики развития исследуемого территориального образования, определенное повышение инвестиционной привлекательности и улучшение социальной сферы. Инерционный сценарий предполагает усиление инвестиционной активности, повышение технологического уровня производства с помощью его модернизации и технического переоснащения и проведение институциональных реформ. В рамках этого сценария также продолжается реализация не только национальных проектов в сферах образования, здравоохранения, агропромышленного комплекса, но и долгосрочных программ развития ключевых секторов экономики. Однако авторы не считают данный сценарий соответствующим достаточному росту качества жизни населения, поскольку инвестиционные ресурсы не используются в полной мере для развития человеческого капитала. При оптимистическом сценарии ожидается более быстрый рост инвестиций в основной капитал, что усилит инновационную составляющую экономического развития. Этот сценарий включает в себя приоритетное развитие науки, образования и здравоохранения, а также наращивание ресурсного потенциала и сферы услуг [21]. В целом данный алгоритм прогнозирования довольно близок к предложенным авторами сценариям прогнозирования УР.

В работе [22] также выделяется три основных группы стратегий, содержащих 14 сценариев развития региона (Иркутской области) до 2007 года. Природоохранные сценарии представлены в каждой из групп и направлены на достижение уровня естественного состояния природных ресурсов (лесопокрытая площадь, минеральные ресурсы, биологические ресурсы, бонитет сельскохозяйугодий и др.) с учетом дополнительных капиталовложений в мероприятия по защите природы. Обычные сценарии направлены на развитие отдельных отраслей (капиталоемких или социоориентированных) или всей экономики без учета экологических рисков, нулевого роста экономики, внедрения ресурсосберегающих технологий и перестройки экономики и др. В случае с Байкальским регионом и сопутствующей экспериментальной оценкой авторы выделяли три сценария: базовый (сохранение промышленно-сырьевой ориентации экономики), рекреационный (высокие темпы развития рекреационного комплекса и сопутствующих отраслей экономики с ежегодным приростом более 10 %), нормативный (перестройка экономики, ее диверсификация, учет экологических рисков и модернизация инфраструктуры) [22].

В работе [23] предлагается универсальный алгоритм формирования экономической модели прогнозирования УР региона на основе ретроспективного анализа значимых показателей развития региона, аппроксимации, статистических методов обработки информации и, что является наиболее важным, корреляционно-регрессионного анализа. В качестве результативного фактора выбрана численность населения региона. При этом отмечается, что частные показатели, формирующие этот фактор, должны слабо коррелировать между собой.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

- 1) обоснования выбора результативного фактора и отбора независимых частных показателей, формирующих его;
- 2) количественного анализа частных показателей парной корреляцией;
- 3) формирования уравнения множественной регрессии;
- 4) проверки значимости факторов в модели по критериям;
- 5) проверки качества множественной регрессии на основе средней ошибки аппроксимации.

Утверждение авторов, что рост численности населения указывает на экономическое развитие субъекта, довольно сомнительно, поскольку в мире существует много регионов с большим процентным приростом численности населения

(без учета миграции), при этом могут отсутствовать социально-бытовые условия для проживания, а уровень санитарии может не соответствовать требованиям ООН по УР.

В работе [24] предложен метод «окна устойчивости», или SuWi (*англ.* Sustainability Window), для комплексного анализа трех взаимосвязанных составляющих УР и выполнения соответствующих прогнозов. Для оценки экономической составляющей используется значение валового внутреннего продукта (ВВП), оценка экологии основана на индикаторах воздействия на природную среду (экологический стресс), таких как выбросы парниковых газов, биоразнообразие, изменение уровня землепользования и др., а в основе оценки социального благополучия лежат показатели здравоохранения, образования и т. д. Эти частные индикаторы индексируются относительно базового года, после чего выполняется расчет показателей продуктивности воздействия на природу и продуктивности социального благополучия на единицу ВВП. Определяются также верхние и нижние пределы изменения ВВП (максимальный и минимальный уровни экономического роста или сокращения), которые считаются устойчивыми с экологической и социальной точек зрения. Максимальный уровень роста ограничен так, чтобы не увеличивать экологический стресс, а минимальный — чтобы не снижать благополучие общества. Кроме того, учитываются абсолютные целевые значения (например, целевые показатели по снижению выбросов углекислого газа в рамках Парижского соглашения), что позволяет переходить от теоретических к практическим сценариям УР. Процесс прогнозирования включает рассмотрение всех теоретически возможных сценариев изменений в производительности экономики, воздействия человека на окружающую среду, общественного благополучия и их взаимной продуктивности, что позволяет выявить устойчивые сценарии экономического роста и спада. Прогнозирование с помощью метода SuWi может быть динамическим, с использованием временных рядов, что делает возможным анализ изменения «окна устойчивости» во времени.

В работе выделено четыре возможных сценария УР:

- экономический рост с увеличением социальной продуктивности и снижением экологической нагрузки на единицу ВВП;
- экономический рост с уменьшением социальной продуктивности, но более значительным снижением экологической нагрузки;
- экономический спад при условии увеличения социальной и экологической продуктивности;
- экономический спад с увеличением социальной продуктивности и снижением экологической нагрузки, при котором поддерживается устойчивость.

Однако нужно отметить, что сценарии экономического спада не соответствуют принципам УР, понимаемым авторами настоящей работы, а скорее имеют отношение к теории антироста. В связи с этим их не следует рассматривать как приемлемые схемы. Кроме того, неясно, каким образом во втором сценарии возможно уменьшение продуктивности социального благополучия, выражаемой как отношение величины социального благополучия к ВВП, если ни та ни другая величина не сокращаются. Работа носит теоретический характер и не содержит вариантов применения метода SuWi на реальных данных.

3.2 Предлагаемые сценарии прогнозирования

Авторы предлагают выделить две основные категории прогнозов по временной составляющей t .

- *Интенсификационный прогноз* применяется при агрессивной стратегии развития региона, когда ставится задача добиться увеличения показателей экономики, экологии и (или) общественного благополучия путем соответствующих инвестиций (например, при строительстве нового производственного комплекса, железной дороги, магистральной наземной трассы, включая нефте- и газопроводы, и т. д.). Для экономического развития будут задействованы дополнительные природные ресурсы региона (земля, леса, водные ресурсы и др.), что обуславливает необходимость

оценки влияния на экологию и общество. Для строительства и эксплуатации объекта потребуются человеческие ресурсы. При этом расчистка земель, рубка лесов и осушение болот могут привести к изменению климата в регионе. Входными данными выступают как текущие показатели региона, так и параметры инвестирования и предполагаемые целевые показатели (достижимые пороговые значения). Прогнозирование осуществляется на короткий срок (время выполнения экономической программы, стройки объекта).

- *Эволюционный прогноз* применяется при сохранении текущих показателей развития региона (без привлечения значительных финансовых средств), когда не планируется вмешательства в экономику со стороны руководства, а состояние экологии и общества не вызывает опасений в краткосрочной перспективе. Входными данными выступают показатели за прошлые годы. Этот прогноз может применяться для всех трех составляющих УР. Например, он подходит для экологической оценки, позволяя выявить степень ухудшения экологии и его временной горизонт при текущем уровне влияния человека; может также использоваться как первое приближение для прогноза УР по сценарию интенсификационного прогноза в условиях недостаточной информации о влиянии реализуемых проектов на состояние окружающей среды и социума. Такой тип прогноза может строиться на продолжительный временной период.

На основе описанных выше категорий прогнозов можно выделить отдельные частные сценарии прогноза УР.

1. *Текущая оценка* – вычисление Q_{iT} УР на время $t_{тек}$. Данный вариант представляет собой текущий анализ на одну точку во времени.
2. *Экономический прогноз* – вычисление прогнозного значения Q_{iII} УР при планировании работ / проекта строительства. Оценивается потенциальный рост экономики, ухудшение экологии, доминирующее воздействие на общество.
3. *Экологический прогноз* – вычисление прогнозного значения Q_{iII} УР при интенсификации работ по восстановлению природной среды, включая лесовосстановление, заболачивание, очистку почв и грунтовых вод, биоремедиацию, вывоз отходов жизнедеятельности человека и др. Применим в регионах с неблагоприятной экологической обстановкой либо подвергшихся серьезному техногенному воздействию, включая загрязнение горюче-смазочными материалами, радиоактивными отходами и т. д. Оценивается прямое и перекрестное влияние на экономику и население.
4. *Прогноз общественного благополучия* – вычисление прогнозного значения Q_{iII} УР при планировании работ по улучшению жизни населения (например, строительство объектов здравоохранения, образования, обновление жилищного фонда, увеличение числа сотрудников правоохранительных органов, введение в строй объектов рекреации и др.). Применим в регионах с неблагоприятной социальной обстановкой (изношенная инфраструктура жилищно-коммунального хозяйства, недостаточное число койко-мест объектов здравоохранения, дефицит мест в детских садах и школах, высокий уровень преступности и т. д.). Оценивается прямое и перекрестное влияние на экономику и экологию.
5. *Смешанный прогноз* – вычисление прогнозного значения Q_{iII} УР при комплексном планировании развития региона. Подразумевает инвестиции в две или все три составляющие УР. Необходим для сбалансированного развития территории без ущерба для экономики, природы и человека.
6. *Пассивный прогноз* – вычисление прогнозного значения Q_{iII} УР при неизменной финансовой и социальной политике в регионе.

Данный перечень частных сценариев прогноза УР не является исчерпывающим и может быть расширен в соответствии с требованиями, формируемыми государством, и (или) складывающейся обстановкой в исследуемых административно-территориальных образованиях.

4 Обсуждение

По результатам проведенного анализа накопленного опыта в области прогнозирования УР и его составляющих можно выделить следующие основные направления:

- Эконометрическое и регрессионное моделирование позволяет выявлять статистические зависимости между экономическими, социальными и экологическими показателями региона. Оно основывается на построении моделей панельных данных [3], позволяющих учитывать пространственно-временную изменчивость, и регрессионных уравнений для прогнозирования динамики ключевых параметров [2, 9, 20].
- Методы машинного обучения и искусственного интеллекта — активно развивающееся направление, которое хорошо подходит для моделирования сложных нелинейных процессов, однако полученные модели, как правило, совершенно непрозрачны. В анализируемой литературе представлены сверточные нейронные сети (*англ.* Convolutional Neural Networks, CNN), применяемые для прогнозирования качества воздуха в городской среде [14], ансамбли моделей машинного обучения, используемые для оценки природно-ресурсного потенциала, в частности потенциала подземных вод [13], и метод опорных векторов, применяемый для прогнозирования экономических и социальных показателей [7, 8].
- Методы системной динамики и оптимизационного моделирования нацелены на моделирование сложных обратных связей в системе «экономика — общество — природа» и поиск оптимальных траекторий развития. Данное направление включает оптимизационные модели управления использованием невозобновляемых ресурсов [10, 11], имитационные модели влияния внешних факторов на экосистемы, комплексные системы моделей для управления процессами регионального развития [22], концептуальные рамки для анализа всех возможных сценариев роста и деградации, такие как «окно устойчивости» (SuWi) [24].

Рассмотрев данные направления, можно сделать вывод, что в целях обеспечения наиболее адекватного прогноза самыми многообещающими являются конечно-разностная модель и искусственные нейронные сети. Первый метод представляет собой усовершенствованный вариант линейной регрессионной модели, в некотором смысле базового метода, зачастую используемого в исследованиях в качестве основы для определения эффективности предлагаемого метода и, как правило, уступающего большинству альтернативных методов. Добавление авторегрессионных слагаемых позволяет учитывать предыдущие значения прогнозируемого параметра, значительно улучшая качество прогноза. Данный класс моделей отличается прозрачностью и хорошо подходит для описания непрерывных процессов с запаздываниями, таких как накопление человеческого капитала, истощение природных ресурсов или отдача от инфраструктурных проектов. В свою очередь, методы глубокого обучения не требуют априорного задания вида функциональной зависимости и демонстрируют высокую эффективность в прогнозировании многомерных временных рядов с шумом, обладают высокой устойчивостью к пробелам в данных, но требуют большого объема данных для качественного обучения и сложной настройки, а также значительных вычислительных ресурсов.

Прогнозирование УР не является самоцелью: достижение определенных показателей или недопущение превышения пороговых значений выступает лишь первой и наглядной формой реализации устойчивости. Выполнение прогнозов, наряду с количественными оценками наборов показателей, следует рассматривать как необходимый инструмент для осуществления управления, рационального природопользования, экологического планирования и социального инфраструктурного развития. Прогнозирование предоставляет информацию, на основе которой можно оценить и принять обоснованное и эффективное решение для УР исследуемого территориального образования на заданном

временном интервале. Именно прогноз позволяет на следующем этапе осуществлять планирование в регионе или другом административно-территориальном образовании и на основе нескольких имеющихся сценариев выбрать наиболее предпочтительный.

5 Выводы

Прогнозирование УР является ключевым инструментом поддержки принятия стратегических управленческих решений. На основе анализа современных направлений прогнозирования для практической проверки выбраны два перспективных, но методологически различных подхода: конечно-разностные модели и искусственные нейронные сети. Первый подход обеспечивает прозрачность, интерпретируемость и адекватность для моделирования динамических процессов с запаздываниями. Второй подход демонстрирует высокую эффективность в прогнозировании многомерных временных рядов со сложными нелинейными зависимостями. Их отдельная апробация позволит провести сравнительную оценку преимуществ и ограничений каждого метода в контексте прогнозирования УР.

На основе комплексного подхода к УР как к системе взаимосвязанных экономической, экологической и социальной компонент предложена векторная модель УР (1). В рамках модели выделены ключевые типы прогноза — интенсификационный и эволюционный, — а также шесть частных сценариев. Разработанная схема позволяет переходить от построения прогнозов к этапу планирования, обеспечивая выбор оптимальной траектории развития региона на основе сравнения многовариантных сценариев, полученных с помощью проверяемых методов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания № FSFE-2023-0005 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Журкин И.Г., Орлов П.Ю., Грузинов В.С. и др. Выбор аналитической модели и количественных показателей для геоинформационного анализа устойчивого развития территориальных образований // *Геодезия и картография*. 2024. № 9. С. 46–56. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1011-9-46-56.
2. Сиротина Н.А., Копотева А.В., Затонский А.В. Метод конечно-разностного социально-экономического прогнозирования // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2021. № 1. С. 174–189. DOI:10.15593/2499-9873/2021.1.10.
3. Вдовин С.М., Гуськова Н.Д., Неретина Е.А. и др. Прогнозирование устойчивости развития региона на основе экономико-математического моделирования // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2016. № 9(342). С. 18–27.
4. Касимова Т.М. Модели панельных данных как инструмент анализа и прогнозирования экономических показателей регионов РФ // *Фундаментальные исследования*. 2020. № 3. С. 48–53. DOI:10.17513/fr.42698.
5. Ратникова Т.А. Введение в эконометрический анализ панельных данных // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. 2006. Т. 10, № 2. С. 267–316.
6. Redmond T., Nasir M.A. Role of natural resource abundance, international trade and financial development in the economic development of selected countries // *Resources Policy*. 2020. Vol. 66. P. 65–78. DOI:10.1016/j.resourpol.2020.101591.
7. Hamdi T., Ben Ali J., Di Costanzo V. Accurate prediction of continuous blood glucose based on support vector regression and differential evolution algorithm // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 38. P. 362–372. DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
8. Wang F.K., Du T. Implementing support vector regression with differential evolution to forecast motherboard shipments // *Expert Systems with Applications*. 2014. Vol. 41. Iss. 8. P. 3850–3855. DOI:10.1016/j.eswa.2013.12.022.

9. Сиротина Н.А., Копотева А.В., Затонский А.В. Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21, № 2. С. 154–166. DOI:10.14529/ctcr210215.
10. Горячев А.А. Моделирование добычи в мировых и региональных оптимизационных газовых моделях // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2015. № 6. С. 51–58. DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
11. Кузнецов Ю.А., Семенов А.В., Власова М.Н. Математическое моделирование оптимального использования невозобновимых природных ресурсов // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 32. С. 45–57.
12. Затонский А.В., Сиротина Н.А. Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22, № 2. С. 96–106. DOI:10.14529/ctcr220209.
13. Arabameri A., Pal S.C., Rezaie F., et al. Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021. Vol. 36. P. 100848. DOI:10.1016/j.ejrh.2021.100848.
14. Chauhan R., Kaur H., Alankar B. Air Quality Forecast using Convolutional Neural Network for Sustainable Development in Urban Environments // Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 75. P. 103239. DOI:10.1016/j.scs.2021.103239.
15. Chenary K., Pirian Kalat O., Sharifi A. Forecasting sustainable development goals scores by 2030 using machine learning models // Sustainable Development. 2024. Vol. 32. Iss. 6. P. 6520–6538. DOI:10.1002/sd.3037.
16. Копотева А.В., Максимов А.А., Сиротина Н.А. Модели машинного обучения в задаче прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21, № 4. С. 126–136. DOI:10.14529/ctcr210411.
17. Трещевский Ю.И., Новиков В.А., Борзаков Д.В. Прогнозирование динамики параметров устойчивого эко-социо-экономического развития регионов на основе методов эмпирического моделирования // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 32(6). С. 305–310. DOI:10.24412/2309-4788-2020-10734.
18. Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Пашкова М.И. и др. Прогнозирование регионального развития // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 6. С. 9–11.
19. Бушуев В.В., Голубев В.С., Селюков Ю.Г. Энергоинформационные основы устойчивого развития (на примере российских регионов). М.: Энергия, 2005. 58 с.
20. Затонский А.В., Сиротина Н.А. Прогнозирование экономических систем по модели на основе регрессионного дифференциального уравнения // Экономика и математические методы. 2014. Т. 50, № 1. С. 91–99.
21. Шаталова О.И. Совершенствование инструментария стратегического планирования и прогнозирования регионального развития // Материалы II Ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука — региону». Ставрополь: Фабула, 2014. С. 112–120.
22. Аргучинцева А.В., Аргучинцев В.К., Батурин В.А. и др. Моделирование и управление процессами регионального развития / под ред. С.Н. Васильева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 432 с.
23. Руденко Л.Г. Формирование методического подхода к прогнозированию устойчивого развития региона // Проблемы рыночной экономики. 2024. № 1. С. 46–61. DOI:10.33051/2500-2325-2024-1-46-61.
24. Luukkanen J., Vehmas J., Kaivo-oja J., et al. Towards a General Theory of Sustainable Development: Using a Sustainability Window Approach to Explore All Possible Scenario Paths of Economic Growth and Degrowth // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 13. P. 5326. DOI:10.3390/su16135326.

АВТОРЫ **Боярчук Матвей Александрович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информатики и геоинформационных технологий, факультет
геоинформатики и информационной безопасности
канд. техн. наук
 0000-0001-8218-2677

Журкин Игорь Георгиевич

 zhurkin@miigaik.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информатики и геоинформационных технологий, факультет
геоинформатики и информационной безопасности
д-р техн. наук, профессор
 0000-0002-2277-1557

Орлов Павел Юрьевич

 knightrider3e0@gmail.com
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информатики и геоинформационных технологий, факультет
геоинформатики и информационной безопасности
канд. техн. наук
 0000-0002-5323-4754

Поступила 02.09.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Research Objective Definition and Analysis of Forecasting Approaches in the Case of Sustainable Development Assessment of a Territorial Entity

Matvei A. Boyarchuk¹✉, Igor G. Zhurkin¹, Pavel Yu. Orlov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ 000002248@edu.miigaik.ru

CITATION Boyarchuk MA, Zhurkin IG, Orlov PYu. Research Objective Definition and Analysis of Forecasting Approaches in the Case of Sustainable Development Assessment of a Territorial Entity. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 54–72. DOI:10.30533/GiA-2025-054.

KEYWORDS geoinformation analysis, natural resource potential, sustainable development, finite difference model, forecasting

ABSTRACT By now, a large number of studies have been conducted in the field of sustainable development forecasting, both in terms of single components and on a country-wide scale, including in accordance with UN regulatory documents. However, there is no consensus on the approaches used, the mathematical apparatus and the sustainability criteria. This research attempts to formulate and formalize the task of forecasting sustainable development, as well as to analyse current experience and select the most appropriate method for forecasting the sustainable development of territories with arbitrary composition and mixed organisational structures. The basic categories and baseline scenarios for sustainable development forecasting are proposed. A forecast accuracy of 10–20 % has been selected as required and sufficient. Linear multiple models, panel data, regression-differential models, including those using the support vector machine, optimisation mathematical models, finite difference models, and machine learning methods are considered. Their advantages and disadvantages are noted. Controversial approaches and concepts from a scientific point of view are critically examined, including the time density of regional development. Requirements for forecasting the sustainability of territory development are also presented, along with strategies and scenarios for their improvement. The study leads to the conclusion that the finite-difference model and artificial neural networks are the most promising of the approaches considered. Although, the drawback of artificial neural networks application is the necessity of experimental selection of the model structure for the task to be solved, the possibility of deadlock situations during training, and the unpredictable nature of the results.

ACKNOWLEDGEMENTS The research was carried out within the state assignment No. FSFE-2023-0005 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

- REFERENCES**
- Zhurkin IG, Orlov PYu, Gruzinov VS, et al. Vybor analiticheskoy modeli i kolichestvennykh pokazatelej dlja geoinformacionnogo analiza ustojchivogo razvitiya territorial'nykh obrazovaniy [Selecting an analytical model and quantitative indicators for geoinformation analysis of territorial entities sustainable development]. *Geodesy and Cartography*. 2024;9: 46–56. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1011-9-46-56.
 - Sirotnina NA, Kopoteva AV, Zaton'skiy AV. Metod konechno-raznostnogo sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniya [Finite differences method for socio-economic modeling]. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2021;1: 174–189. (In Russian). DOI:10.15593/2499-9873/2021.1.10.
 - Vdovin SM, Gus'kova ND, Neretina EA, et al. Prognozirovanie ustoichivosti razvitiya regiona na osnove ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya [Region's sustainable development prediction on the basis of economic-mathematical modeling]. *National Interests: Priorities and Security*. 2016;9(342): 18–27. (In Russian).
 - Kasimova TM. Modeli panel'nykh dannykh kak instrument analiza i prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazatelei regionov RF [Panel data models as a tool for analysis and forecasting of economic indicators of Russian regions]. *Fundamental Research*. 2020;3: 48–53. (In Russian). DOI:10.17513/fr.42698.
 - Ratnikova TA. Vvedenie v ekonometricheskii analiz panel'nykh dannykh [Introduction to econometric analysis of panel data]. *Higher School of Economics Economic Journal*. 2006;10(2): 267–316. (In Russian).
 - Redmond T, Nasir MA. Role of natural resource abundance, international trade and financial development in the economic development of selected countries. *Resources Policy*. 2020;66: 65–78. DOI:10.1016/j.resourpol.2020.101591.
 - Hamdi T, Ben Ali J, Di Costanzo V. Accurate prediction of continuous blood glucose based on support vector regression and differential evolution algorithm. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2018;38: 362–372. DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
 - Wang FK, Du T. Implementing support vector regression with differential evolution to forecast motherboard shipments. *Expert Systems with Applications*. 2014;41(8): 3850–3855. DOI:10.1016/j.eswa.2013.12.022.
 - Sirotnina NA, Kopoteva AV, Zaton'skiy AV. Primenenie konechno-raznostnykh modelei dlya kratkosrochnogo prognozirovaniya prirodno-resursnogo potentsiala Permskogo kraja [Finite-difference models application for short-term forecasting of the natural resource potential of the Perm region]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2): 154–166. (In Russian). DOI:10.14529/ctcr210215.
 - Goryachev AA. Modelirovanie dobychi v mirovykh i regional'nykh optimizatsionnykh gazovykh modelyakh [Gas production modeling in the world and regional natural gas optimization models]. *Problems of economics and management of oil and gas complex*. 2015;6: 51–58. (In Russian). DOI:10.1016/j.bbe.2018.02.005.
 - Kuznetsov YuA, Semenov AV, Vlasova MN. Matematicheskoe modelirovanie optimal'nogo ispol'zovaniya nevozobnovimyykh prirodnykh resursov [Mathematical modeling of optimal use of non-renewable natural resources]. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2012;32: 45–57. (In Russian).
 - Zaton'skiy AV, Sirotnina NA. Upravlenie prirodno-resursnym potentsialom Permskogo kraja na osnove konechno-raznostnoi modeli vtorogo poryadka [Management of the natural resource potential of the Perm region on the basis of a second-order finite-difference model]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2): 96–106. (In Russian). DOI:10.14529/ctcr220209.
 - Arabameri A, Pal SC, Rezaie F, et al. Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021;36: 100848. DOI:10.1016/j.ejrh.2021.100848.
 - Chauhan R, Kaur H, Alankar B. Air Quality Forecast using Convolutional Neural Network for Sustainable Development in Urban Environments. *Sustainable Cities and Society*. 2021;75: 103239. DOI:10.1016/j.scs.2021.103239.

15. Chenary K, Pirian Kalat O, Sharifi A. Forecasting sustainable development goals scores by 2030 using machine learning models. *Sustainable Development*. 2024;32(6): 6520–6538. DOI:10.1002/sd.3037.
16. Kopoteva AV, Maksimov AA, Sirotnina NA. Modeli mashinnogo obucheniya v zadache prognozirovaniya prirodno-resurnogo potentsiala Permskogo kraya [Perm region natural resource potential forecasting using machine learning models]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(4): 126–136. (In Russian). DOI:10.14529/ctcr210411.
17. Treschevsky YuI, Novikov VA, Borzakov DV. Prognozirovanie dinamiki parametrov ustoichivogo eko-sotsio-ekonomicheskogo razvitiya regionov na osnove metodov empiricheskogo modelirovaniya [Prediction of dynamics of sustainable eco-socioeconomic development of regions based on empirical modeling methods]. *Natural-Humanitarian Studies*. 2020;32(6): 305–310. (In Russian). DOI:10.24412/2309-4788-2020-10734.
18. Volkova SN, Sivak EE, Pashkova MI, et al. Prognozirovanie regional'nogo razvitiya [Forecasting regional development]. *Bulletin of the Kursk State Agrarian University*. 2015;6: 9–11. (In Russian).
19. Bushuev VV, Golubev VS, Selyukov YuG. *Energoinformatsionnye osnovy ustoichivogo razvitiya (na primere Rossiiskikh regionov)* [Energy information foundations of sustainable development (based on the example of Russian regions)]. Moscow: Energy; 2005. 58 p. (In Russian).
20. Zatonkiy AV, Sirotnina NA. Prognozirovanie ekonomicheskikh sistem po modeli na osnove regressionnogo differentsial'nogo uravneniya [Prediction of economic system based on regression model with differential equation]. *Economics and Mathematical Methods*. 2014;50(1): 91–99. (In Russian).
21. Shatalova OI. Sovershenstvovanie instrumentariya strategicheskogo planirovaniya i prognozirovaniya regional'nogo razvitiya [Improving the tools for strategic planning and forecasting regional development]. *Proceedings of the II Annual Scientific and Practical Conference of the North-Caucasus Federal University "University Science for the Region"*. Stavropol: Fabula; 2014: 112–120. (In Russian).
22. Arguchintseva AV, Arguchintsev VK, Baturin VA, et al. *Modelirovanie i upravlenie protsessami regional'nogo razvitiya* [Modeling and management of regional development processes]. Moscow: FIZMATLIT; 2001. 432 p. (In Russian).
23. Rudenko LG. Formirovanie metodicheskogo podkhoda k prognozirovaniyu ustoichivogo razvitiya regiona [Formation of a methodological approach to forecasting the sustainable development of the region]. *Market economy problems*. 2024;1: 46–61. (In Russian). DOI:10.33051/2500-2325-2024-1-46-61.
24. Luukkanen J, Vehmas J, Kaivo-oja J, et al. Towards a General Theory of Sustainable Development: Using a Sustainability Window Approach to Explore All Possible Scenario Paths of Economic Growth and Degrowth. *Sustainability*. 2024;16(13): 5326. DOI:10.3390/su16135326.

AUTHORS **Matvei A. Boyarchuk**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Informatics and Geoinformation Technologies, Faculty of Geoinformatics and Information Security
 PhD in Engineering
 0000-0001-8218-2677

Igor G. Zhurkin

 zhurkin@miiigaik.ru
 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Informatics and Geoinformation Technologies, Faculty of Geoinformatics and Information Security
 Dr. of Sci. (Engineering), Professor
 0000-0002-2277-1557

Pavel Yu. Orlov

✉ knightrider3e0@gmail.com

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Informatics and Geoinformation Technologies, Faculty of Geoinformatics and Information Security

PhD in Engineering

 0000-0002-5323-4754

Submitted: September 02, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Картографическое обеспечение научно-производственной деятельности: отечественный опыт, периодизация и современные проблемы

Д.С. Логинов¹✉

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ loginov@geohorizon.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Логинов Д.С. Картографическое обеспечение научно-производственной деятельности: отечественный опыт, периодизация и современные проблемы // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 73–86. DOI:10.30533/GiA-2025-024.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА периодизация, картографическое обеспечение, библиографический анализ, терминология

АННОТАЦИЯ Современное картографическое обеспечение — важный индикатор востребованности методов картографии при решении прикладных задач научно-производственной деятельности с помощью цифровых картографических продуктов. Определение путей дальнейшего развития практико-ориентированного направления картографии в современных условиях информатизации общества требует учета и систематизации накопленного опыта отечественного картографического обеспечения. В статье представлены результаты библиографического анализа опубликованных в период с 1971 по 2025 год работ о картографическом обеспечении различных сфер научно-производственной деятельности. Выделены и охарактеризованы этапы развития отечественного картографического обеспечения советского (1971–1991 годы) и российского (с 1991 года по настоящее время) периодов. Временные границы этапов установлены по статистическому распределению числа публикаций и качественным изменениям, связанным с появлением новых видов цифровых картографических продуктов, средств их подготовки и использования. По результатам исследования можно констатировать востребованность цифровых картографических продуктов для решения задач природо-, недропользования и других стратегических сфер научно-производственной деятельности. Выявлены проблемы употребления термина «картографическое обеспечение», способствующие повышению значимости иных видов обеспечения пространственными данными. Установлена необходимость научно обосновать современный состав конечных видов результатов картографического обеспечения, а также модернизировать и развить иные подходы к пониманию его сути.

1 Введение

Современная научно-техническая и производственная деятельность (далее — научно-производственная деятельность) направлена на решение целого спектра глобальных государственных и региональных задач в рамках системного функционирования науки, техники и производства. При выполнении прикладных задач осуществляется обеспечение научно-производственной деятельности — комплекс мероприятий, направленных на ее снабжение методологическими, информационными, техническими и иными ресурсами, результатами теоретических и практических изысканий, выполняемых в рамках вспомогательных по отношению к основному процессу межотраслевых исследований. В составе данного комплекса картографическое обеспечение занимает особое место, поскольку способствует познанию аспектов окружающей действительности, связанных с научно-производственной деятельностью, посредством создания и использования картографических продуктов и иных информационных ресурсов.

Сегодня картографическое обеспечение — важный индикатор востребованности методов картографии при решении прикладных задач научно-производственной деятельности. Поддержание его функционального состояния — одна из ключевых задач картографии в современных условиях развития геоинформационных технологий, науки о данных, геоматики, искусственного интеллекта, а для научно-производственной деятельности это значимый инструмент принятия решений, требующий теоретико-методологической модернизации. Решить указанные задачи невозможно без учета накопленного опыта отечественного картографического обеспечения, систематизация которого до сих пор оставалась без должного внимания, несмотря на популярность термина. В связи с вышесказанным цель данного исследования — выполнить периодизацию и аналитический обзор развития отечественного картографического обеспечения, выявить характерные черты и тенденции этого развития.

2 Материалы и методы

В основе исследования лежит библиографический анализ научных работ различного уровня (от тезисов докладов научных конференций до монографий и авторефератов диссертаций), опубликованных с 1971 по 2025 год и находящихся в российской научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU и международных системах цитирования, а также представленных в серии библиографических указателей «Современная литература по картографии»^{1,2} и «Национальная библиография научно-технической литературы по картографии»³.

Критерий отбора публикаций для анализа — наличие термина «картографическое обеспечение» (в том числе «картографическое сопровождение», «картографическая обеспеченность») в заголовках, аннотациях и ключевых словах. Публикации классифицировались по следующим параметрам:

- 1) место термина «обеспечение» в публикации;
- 2) характер издания, в котором опубликована работа;
- 3) вариативность используемого термина;

1 Современная литература по картографии: библиографический указатель: в 2 ч. Л.: Изд-во БАН СССР, 1989. 784 с.

2 Современная литература по картографии 1988–1990: библиографический указатель / сост. О.А. Красникова, Г.Н. Утин; отв. ред. Г.Н. Утин. СПб.: БАН СССР, 1991. 331 с.

3 Комедчиков Н.Н., Лютый А.А., Нарских Р.С. Национальная библиография научно-технической литературы по картографии, 1959–1983 гг. / Рос. акад. наук, Ин-т географии. М.: ЦИСН Миннауки РФ и РАН, 1996–1997. Т. 1. 1996. 335 с.; Т. 2. 1997. 560 с.; Т. 3. 1997. 564 с.

- 4) сфера научно-производственной деятельности;
 - 5) форма конечного результата картографического обеспечения.
- Всего было проанализировано свыше 335 публикаций для периода с 1971 по 1990 год и свыше 490 публикаций — для периода с 1991 по 2025 год.

3 Результаты

Библиографический анализ позволил выделить следующие этапы развития отечественного картографического обеспечения научно-производственной деятельности:

- 1) советский период (1971–1991 годы);
- 2) российский период:
 - этап I (1991–2010 годы);
 - этап II (2011–2016 годы);
 - этап III (2017–2020 годы);
 - этап IV (2021 год — настоящее время).

Динамика числа публикаций представлена на рис. 1, распределение по виду изданий дано на рис. 2. Ниже приведена краткая характеристика каждого этапа.

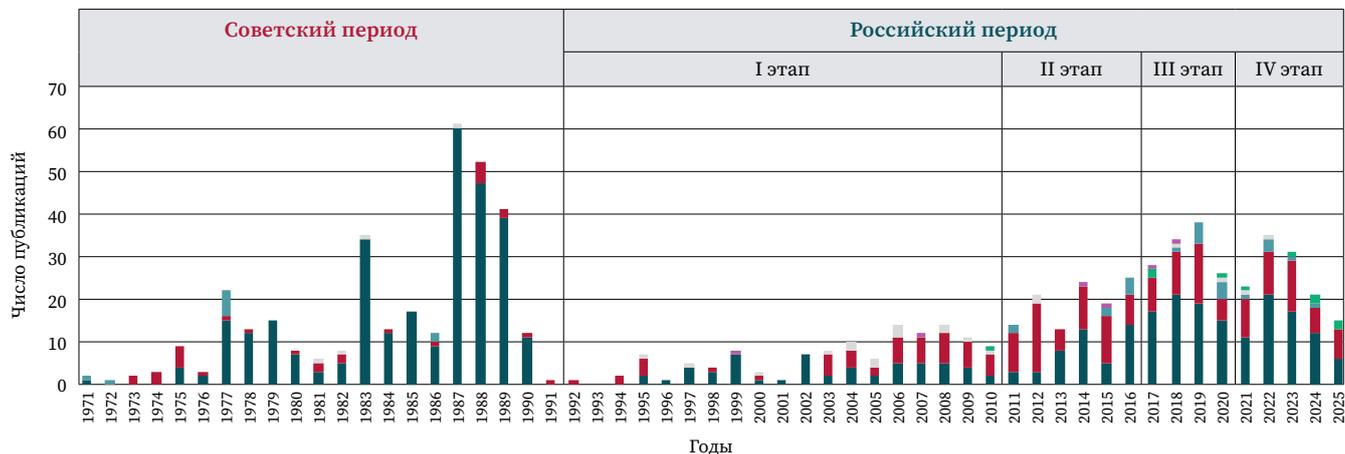
Рис. 1  Динамика числа публикаций по картографическому обеспечению за 1971–2025 гг.

Fig. 1 Dynamics of the number of publications on cartographic support for the period 1971–2025 гг.



Рис. 2  Динамика числа публикаций по виду издания (1971–2025 гг.)

Fig. 2 Dynamics of the number of publications by type of publication (1971–2025)



3.1 Советский период (1971–1991 годы)

В советский период развития отечественной картографии картографическому обеспечению уделялось много внимания. Как отмечают К.Н. Дьяконов, Н.С. Касимов и В.С. Тикунов⁴, наиболее ярко вопросы использования карт были проиллюстрированы в 1980 году К.А. Салищевым в статье «Картография на службе рационального природопользования: состояние и задачи»⁵. В этом исследовании «на примере обеспечения работ по рациональному природопользованию показана роль и направления использования государственных топографических и отраслевых тематических карт, а также комплексных региональных атласов»⁶. Таким образом, К.А. Салищевым был описан методологический подход, согласно которому картографическое обеспечение представляет собой подготовку серии тематических и (или) специальных карт и выполнение по ним прикладных исследований с помощью различных приемов анализа, адаптированных к конкретным задачам. Последующие многочисленные исследования по вопросам картографического обеспечения различных сфер народного хозяйства СССР основаны на этих подходах и принципах.

Советский период отечественного картографического обеспечения характеризуется активным вовлечением картографической отрасли в реализацию государственных программ развития различных отраслей народного хозяйства, тесное взаимодействие картографов и тематических специалистов. Об этом свидетельствует статистика: свыше 335 публикаций было выпущено в период с 1971 по 1991 год (в среднем 16 публикаций в год), из которых подавляющее большинство представлено материалами и тезисами докладов конференций (рис. 2). Картографическое обеспечение потребностей народного хозяйства становилось темой всесоюзных совещаний (1987), региональных научно-технических конференций по тематическому картографированию (1973, 1975, 1977, 1978, 1983, 1988–1990).

Заголовки и содержание кратких сообщений и тезисов свидетельствуют об обеспокоенности вопросами создания карт и комплексных региональных атласов для планирования, мониторинга, прогнозирования, управления, развития отраслей промышленности, среди которых сельское хозяйство, аграрно-промышленный комплекс, использование трудовых ресурсов, рациональное природопользование, социальное и экономическое развитие городов, охрана природы, образование.

Термин «картографическое обеспечение» присутствует в заголовках свыше 84 % публикаций по теме исследования. Единично встречаются следующие словосочетания: «создание карт для обеспечения» (1979), «картографические работы для обеспечения» (1981), «система карт в обеспечении» (1975, 1982, 1983, 1985), «картографическая обеспеченность» (1977, 1983, 1985), «обеспечение картами» (1974, 1975, 1977, 1983), «картирование (картографирование) для обеспечения» (1983), «картографирование как метод обеспечения» (1983), «обеспечение картами» (1983), «система картографического обеспечения» (1987). Многообразие терминов иллюстрирует синонимизацию обеспечения с результатом (карты), с картографическими работами и тематическим картографированием. Таким образом, картографическое обеспечение призвано помочь в познании пространственного аспекта содержательной части тематических исследований и применении полученных знаний для выработки и реализации программы рационального взаимодействия с окружающей действительностью в контексте научно-производственной деятельности. Проявляется основная суть картографического обеспечения как связующего звена картографо-геодезической отрасли и народного хозяйства.

4 Дьяконов К.Н., Касимов Н.С., Тикунов В.С. Современные методы географических исследований. Книга для учителя. М.: Просвещение, АО «Учебная литература», 1996. 117 с.

5 Салищев К.А. Картография на службе рационального природопользования: состояние и задачи // Итоги науки и техники. Серия: Картография. М.: ВИНТИ АН СССР, 1980. Т. 9. С. 4–22.

6 Дьяконов К.Н., Касимов Н.С., Тикунов В.С. Современные методы географических исследований ... С. 23.

3.2 Российский период

3.2.1 Этап I (1991–2010 годы)

После образования Российской Федерации картографическое обеспечение как направление исследований сохранило свою значимость, однако резко уменьшилась среднегодовая частота встречаемости публикаций различного уровня (в среднем 8 публикаций в год). Характерно рассмотрение вопросов картографического обеспечения преимущественно региональных экологических исследований и мониторинга (в том числе серия работ И.Н. Ротановой), территориального планирования и устойчивого развития территорий, туристско-рекреационной деятельности, геоэкологических исследований, нефтегазобывающей промышленности и недропользования, землеустройства и кадастра. В подавляющем большинстве публикаций термин «картографическое обеспечение» продолжает использоваться в качестве синонима понятий «карта», «серия карт», «картографический материал». В работах уделяется внимание двум аспектам использования карт:

- 1) как источника информации для выполнения работ;
- 2) как результата работ по сопровождению научно-производственной деятельности.

Несмотря на доминирование традиционного подхода к пониманию обеспечения, рассматриваемый этап сопровождался началом внедрения геоинформационных технологий в картографическое производство. Получение картографических результатов с использованием геоинформационных систем (ГИС) авторы публикаций отмечали добавлением геоинформационной составляющей к термину «картографическое обеспечение». В результате в понятийно-бытовом поле российской картографии появились следующие виды обеспечения: «геоинформационное и картографическое», «информационно-картографическое» (с 1995 года), «цифровое картографическое» (с 1997 года), «картографо-геоинформационное» (с 1999 года), «картографическое и геоинформационное» (с 2003 года), «геоинформационно-картографическое» (с 2008 года), «электронно-картографическое» (с 2010 года). Неустойчивость новых терминологических конструкций подчеркивается различного рода уточнениями: «ГИС-ориентированное картографическое» (1997), картографическое обеспечение «с использованием ГИС» (2007), «с применением геоинформационных технологий» (2009).

Появление в нормативной картографии термина «(цифровое) картографическое обеспечение» («комплекс мероприятий, направленных на создание, хранение цифровой картографической продукции и выдачу ее потребителям»⁷) можно трактовать как первую попытку стандартизации и фиксации значения обеспечения в государственных картографических работах.

3.2.2 Этап II (2011–2016 годы)

С 2011 года зафиксирован устойчивый рост числа публикаций, в которых исследователи применяли термин «картографическое обеспечение» для идентификации своих научных изысканий. Частотный анализ показал повышение среднегодового числа публикаций в 2,3 раза (с 8 публикаций за этап I до 19 публикаций за этап II). Однако использование термина «обеспечение» стало носить избирательный характер: об этом свидетельствуют снижение до 78 % доли публикаций, в которых термин находится в заголовке работы, и соответствующее увеличение случаев использования термина в ключевых словах (30 %) и аннотации (40 %).

Приоритетные сферы научно-производственной деятельности — экологические исследования и мониторинг, территориальное планирование [1], управление особо охраняемыми природными территориями (в том числе серия работ Н.А. Алексеенко [2, 3]), туристско-рекреационная деятельность (в том числе серия работ Т.С. Комиссаровой), геоэкологические исследования. Зафиксирован

⁷ ГОСТ 28441-99. Картография цифровая. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 1999. С. 1.

резкий рост интереса к вопросам обеспечения учебно-образовательной деятельности [4], геохимических исследований, хозяйственно-управленческой деятельности, обеспечения муниципальных образований и городских (урбанизированных) территорий.

Наблюдается разнообразие форм результатов картографического обеспечения, появляются исследования по созданию нескольких видов конечных продуктов. Доминирующим результатом картографического обеспечения остаются тематические карты, серия карт (свыше 40 % работ), однако вопросы их создания и применения уходят в плоскость использования ГИС и методов пространственного анализа, математико-картографического моделирования. В результате под картографическим обеспечением начинает пониматься создание электронных карт, разработка картографических баз данных, уделяется внимание подготовке картографических основ информационно-аналитических систем, муниципальных ГИС, специализированных ГИС, интегрированных ГИС. С 2012 года рассматривается формализация картографических процессов в виде инструментальной справочно-аналитической ГИС, создание пространственных данных, а с 2013 года исследуются вопросы разработки ГИС-атласов, картографических интернет-сервисов, веб-интерфейсов, электронных картографических ресурсов.

Таким образом, рассматриваемый этап характеризуется началом сближения картографического, информационного и геоинформационного обеспечения. Кроме того, появляются новые термины, акцентирующие внимание на функции картографического обеспечения, — «навигационно-картографическое», «оперативное картографическое» [5], «планово-картографическое», «информационно-картографическое» [6].

3.2.3 Этап III (2017–2020 годы)

Повсеместное использование геоинформационных технологий способствует расширению спектра картографических продуктов, формируемых для практической реализации задач отраслей промышленности и экономики. И.Н. Ротанова отмечает, что в «современном информационном обществе прослеживается тенденция возрастания роли геоинформационно-картографического обеспечения науки и практики» с формированием «виртуальной географической среды» [7, с. 165]. Предметом большинства исследований становятся базы пространственных данных, состав результатов дополняется вопросами разработки ГИС-проектов, картографической визуализации, создания тематических карт. В методическом плане картографическое обеспечение начинает активно синонимизироваться с геоинформационным картографированием.

В статистическом отношении рассматриваемый этап характеризуется:

- 1) резким увеличением среднегодового числа публикаций (в среднем 32 публикации в год);
- 2) преобладанием (впервые с советского периода) материалов и тезисов докладов конференций над публикациями в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК), и монографиями (3 к 2 соответственно);
- 3) увеличением числа статей, в которых употребляется термин «геоинформационно-картографическое обеспечение»;
- 4) сохранением интереса к картографическому обеспечению туризма, особо охраняемых природных территорий [8], рационального природопользования [9], мониторинговых работ, вопросов развития территорий, земельного кадастра, а также к обеспечению задач картографо-геодезической отрасли и навигации.

Тенденция сближения картографического и геоинформационного обеспечения приводит к неустойчивому пониманию состава и взаимодействия картографического, геоинформационного и информационного обеспечения. Традиционные результаты заменяются терминами «картографические материалы», «картографическая информация», «информационно-картографические системы», «геоинформационно-картографическая модель», «картографическая модель», «цифровая картографическая модель», «геоинформационно-картографические материалы».

Еще одно качественное отличие этапа — появление новых веб-картографических продуктов. Впервые рассматривается веб-картографическое обеспечение [10], которое представлено такими результатами, как база геоданных, визуализация, информационные ресурсы, геопортальные технологии, цифровые карты.

3.2.4 Этап IV (2021 год – настоящее время)

Осмысление геоинформационного опыта подготовки тематических карт и пространственных данных с помощью ГИС способствовало резкому снижению числа работ, где в наименовании вида обеспечения указывается геоинформационная составляющая. В результате вопросы геоинформационного картографирования, разработки баз пространственных данных и формирования на их основе широкого спектра картографических материалов (тематические, топографические карты, картографические основы) различных форматов (электронные, цифровые карты, веб-ГИС, информационно-аналитические ресурсы, картографические информационные системы) рассматриваются в составе картографического обеспечения. Как следствие, уменьшилось число «пограничных» видов обеспечения, но увеличилась информационная составляющая (суммарная доля работ с термином «информационно-картографическое обеспечение» составила 15 %).

Внимание исследователей сосредоточено на методических подходах к разработке картографического обеспечения для мониторинга структуры загрязнения и распределения загрязнителей в бассейне озера Байкал [11], для работы региональных органов управления в чрезвычайных ситуациях [12], на создании информационного навигационно-картографического обеспечения для решения задач наземной навигации [13] и др. Рассматриваются вопросы проектирования системы и организации процесса картографического обеспечения [14], ее целевого применения через математическое моделирование процесса производства картографической продукции [15], а также обновление понятия «картографическое обеспечение», под результатом которого исследователи понимают цифровые карты местности [16].

О возобновлении прикладного интереса к вопросам создания карт и необходимости дискуссий в формате конференций свидетельствует сохранение уровня статистического преобладания материалов и тезисов докладов конференций над публикациями в научных журналах, рекомендованных ВАК, зафиксированное на этапе III.

Вследствие ввода в эксплуатацию Единой электронной картографической основы актуализируются вопросы картографического обеспечения Единого государственного реестра недвижимости, кадастровой деятельности, землеустройства, градостроительной документации. Растет доля работ по картографическому обеспечению сельского хозяйства и агропромышленного комплекса. Другие востребованные сферы научно-производственной деятельности — навигация, мониторинг, учебно-образовательная деятельность, геоэкология [16], государственные программы, природопользование и охрана природы [17], туризм. Актуальность картографического обеспечения геолого-геофизических исследований, геологоразведки и недропользования подчеркивается в работах ряда исследователей, а также в многочисленных работах автора, относящихся к этому периоду.

Позитивный момент этапа — обновление термина «(цифровое) картографическое обеспечение», которое, согласно ГОСТ Р 70955-2023, представляет собой «комплекс мероприятий, направленный на содействие решению широкого спектра задач потребителей (цифровой) картографической продукцией»⁸.

⁸ ГОСТ Р 70955-2023. Цифровая картография. Термины и определения. М.: Институт стандартизации, 2023. С. 2.

4 Обсуждение

Рис. 3 

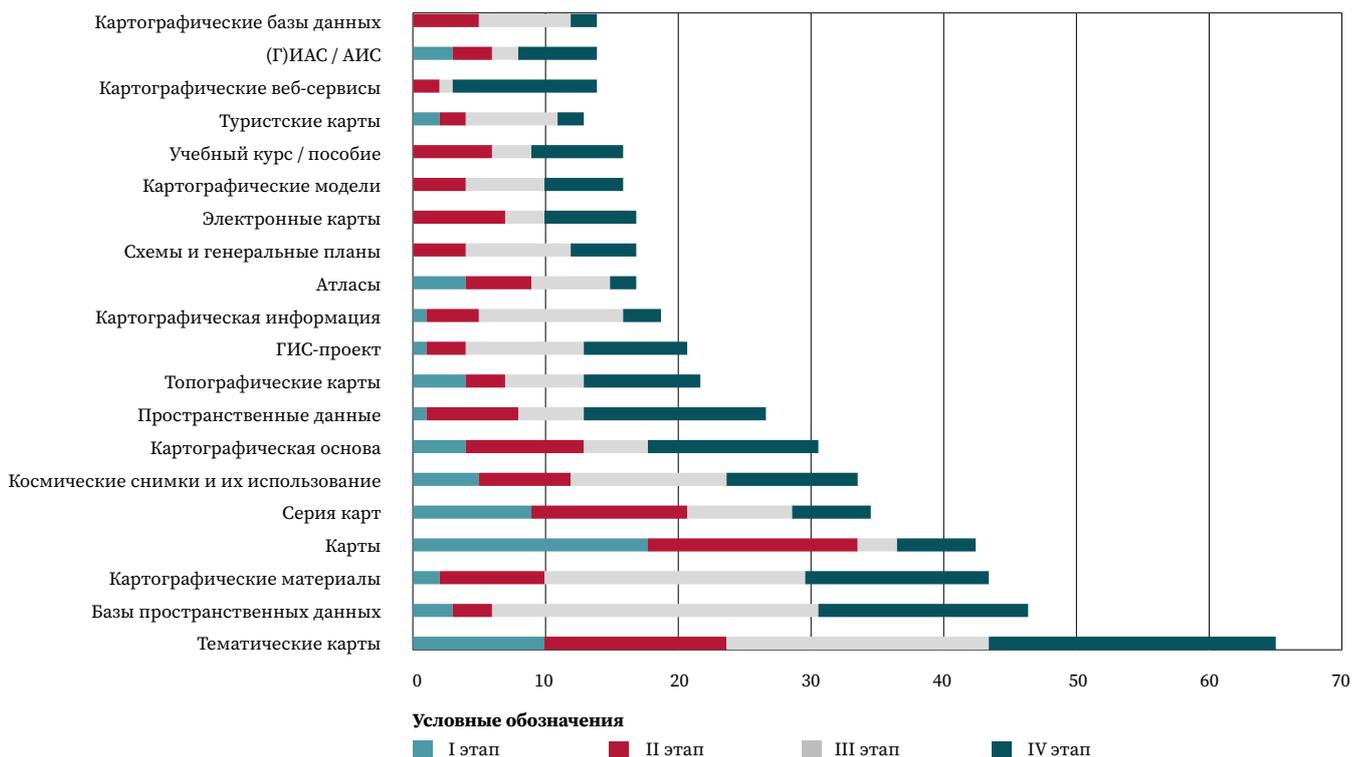
Частота встречаемости результатов работ по картографическому обеспечению (1991–2025 гг.)

Fig. 3

Frequency of naming results of cartographic support works (1991–2025)

Примечание. (Г)ИАС / АИС — (геоинформационная) информационная аналитическая система / автоматизированная информационная система

Результаты библиографического анализа показали, что картографическое обеспечение осуществляется для решения прикладных задач многочисленных сфер научно-производственной деятельности. За последние десятилетия существенно расширилась номенклатура результатов картографического обеспечения от традиционных картографических произведений (карты, серия карт, атласы) до электронных картографических, геоинформационных продуктов и мультимедийных, веб-картографических произведений. В результате к настоящему времени сложилась совокупность картографических продуктов (рис. 3), способствующая познанию пространственных и содержательных аспектов объектов исследования научно-производственной деятельности и их использованию для рационального взаимодействия с окружающей действительностью.



Современные технологии обострили проблему корректного использования термина «картографическое обеспечение». Библиографический анализ показал, что авторы публикаций, стремясь подчеркнуть применение новых технологий при подготовке и использовании карт и картографических продуктов, нередко образуют составные термины вида «геоинформационно-картографическое обеспечение» и «веб-картографическое обеспечение». Наличие таких конструкций формирует неопределенность в использовании термина, и картографические продукты, созданные с применением ГИС, чаще понимаются как результат совершенно иных направлений, таких как геоинформационное и информационное обеспечение. Частота использования подобных терминов способствует негласному закреплению электронных карт, картографических веб-сервисов, геопорталов и др. за геоинформатикой, наукой о данных, в силу приоритетной постановки термина «геоинформационный» при формировании сложных прилагательных, обозначающих вид смешанного обеспечения.

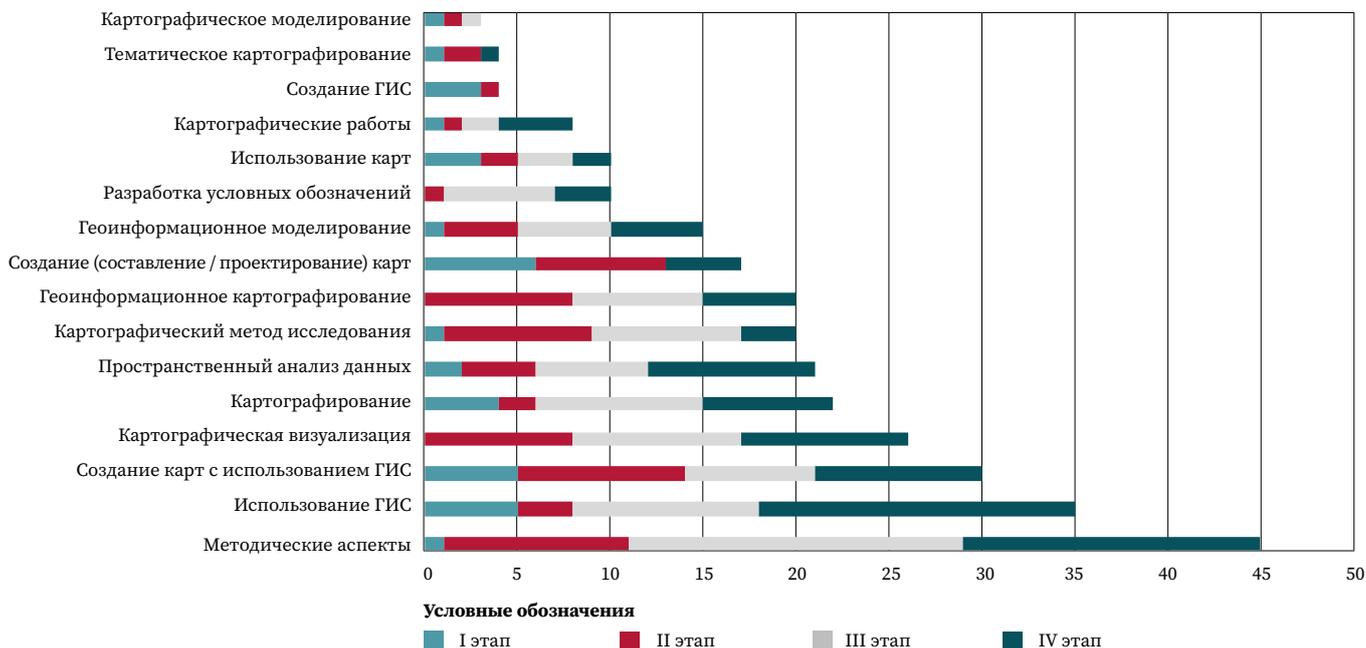
Текущую ситуацию также усложняет многогранность смысловых конструкций, которыми исследователи пользуются при описании термина «картографическое обеспечение» (рис. 4). Ярко выраженная полисемия отражает многогранность картографического обеспечения, и эта проблема присутствует в отечественной картографии в течение многих лет.

Рис. 4 

Перечень наиболее популярных трактовок термина «картографическое обеспечение» (1991–2025 гг.)

Fig. 4

List of the most popular interpretations of the term “cartographic support” (1991–2025)



На наш взгляд, указанные проблемы связаны с продолжением ассоциирования картографического обеспечения исключительно с традиционным результатом картографических работ (карты, серия карт, атласы), что несколько анахронично в силу появления новых цифровых картографических продуктов, создание которых затрагивает методические вопросы геоинформатики и других отраслей науки. Таким образом, объективная необходимость использования систем управления базами данных, ГИС, веб-технологий, средств визуализации и предоставления доступа к пространственным данным — благодатная почва не только для интеграции картографии и современных направлений работы с пространственными данными, но и во многом для размытия границ понимания картографического обеспечения. В целях сохранения идентичности и дальнейшей востребованности картографического обеспечения при реализации современных прикладных задач научно-производственной деятельности представляется целесообразной модернизация методологических принципов понимания картографического обеспечения, заложенных в 1980 году К.А. Салищевым. Необходимо не только научное обоснование сложившегося состава конечных видов результатов картографического обеспечения, но и развитие иных подходов, раскрывающих системность процесса картографического обеспечения и не ограничивающих его исключительно использованием карт.

5 Выводы

Выполненный библиографический анализ публикаций различного уровня позволил выявить и охарактеризовать особенности ключевых этапов развития отечественного картографического обеспечения советского и российского периодов. Результаты констатируют востребованность вопросов подготовки и использования картографических продуктов для решения прикладных задач различных сфер научно-производственной деятельности. Однако расширение их номенклатуры и отсутствие мер по актуализации понимания картографического обеспечения становятся причиной появления производных (смешанных)

видов обеспечения научно-производственной деятельности, находящихся на стыке с геоинформационным и информационным обеспечением. Научное обоснование равного сосуществования с другими видами обеспечения пространственными данными позволит прояснить и стандартизировать условия выбора термина «картографическое обеспечение» и сохранить его востребованность (а следовательно, и картографии) при решении прикладных задач научно-производственной деятельности.

Изучение отечественного опыта картографического обеспечения научно-производственной деятельности — отправная точка исследований автора, направленных на актуализацию подходов к реализации и пониманию картографического обеспечения как важного практико-ориентированного, однако обладающего теоретическим потенциалом направления картографии. Проанализированный опыт советских и российских исследователей позволяет решить отмеченные проблемы до наступления пятого этапа развития отечественного картографического обеспечения, в котором ожидается рост публикаций по использованию веб-сервисов и методов искусственного интеллекта в картографических работах, осуществляемых в рамках научно-производственной деятельности, в том числе стратегического значения.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Плюснин В.М., Владимиров И.Н., Сороковой А.А. Картографическое обеспечение территориального планирования центральной экологической зоны Байкальской природной территории // *Геодезия и картография*. 2012. № 4. С. 22–31.
2. Алексеенко Н.А., Аршинова С.Н. Картографическое обеспечение работы национальных парков России // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2012. № 1. С. 91–95. DOI:10.15356/0373-2444-2012-1-91-95.
3. Алексеенко Н.А. Методические особенности картографического обеспечения природоохранной деятельности особо охраняемых природных территорий России // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2014. № 1. С. 52–57.
4. Бажукова Н.В., Киселева Е.С., Ташкинова А.Н. и др. Комплексное картографическое обеспечение учебного курса «География Пермского края» для высшей школы // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2016. № 5. С. 3–7.
5. Бровко Е.А., Софинов Р.Э. Государственный топографический мониторинг: оперативное картографическое обеспечение актуальными пространственными данными хозяйственной деятельности, обороны и национальной безопасности страны // *Геодезия и картография*. 2012. № 7. С. 45–51.
6. Ротанова И.Н., Харламова Н.Ф. Туристско-рекреационный комплекс Алтайского региона: организация и информационно-картографическое обеспечение: монография. Барнаул: АлтГУ, 2014. 212 с.
7. Ротанова И.Н. Условность карт: традиции и новации // *От карты прошлого — к карте будущего: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Пермь, Кудымкар, 28–30 ноября 2017 г.: в 3 т. Пермь: ПГНИУ, 2017. Т. 2. С. 158–168.*
8. Алексеенко Н.А. Актуальные вопросы картографического обеспечения особо охраняемых природных территорий России // *Геодезия и картография*. 2019. № 1. С. 13–23. DOI:10.22389/0016-7126-2019-943-1-13-23.
9. Николаева О.Н. Картографическое обеспечение рационального природопользования региона: монография. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. 170 с.
10. Лурье И.К., Прохорова Е.А., Семин В.Н. и др. Разработка WEB-картографического обеспечения эколого-географической оценки развития территории Новой Москвы // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2017. № 5. С. 49–57.
11. Снытко В.А., Семенов Ю.М., Семенов М.Ю. и др. Оценка пространственной и временной вариабельности содержания потенциальных загрязнителей в водах озера Байкал и его притоков // *География: развитие науки и образования: в 2 т. СПб.: Астерион, РГПУ им. А.И. Герцена, 2020. Т. 2. С. 114–117.*
12. Карманова М.В., Комиссарова Е.В. Картографическое обеспечение организации оперативных действий в зоне наводнения на основе оперативных донесений региональных органов управления в чрезвычайных ситуациях // *Материалы*

- Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27, ч. 1. С. 85–98. DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-85-98.
13. Смирнов В.Н. Экспериментальная проверка методики создания информационного навигационно-картографического обеспечения для решения задач наземной навигации // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 5. С. 568–574. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-568-574.
 14. Чернов И.В., Якунин В.И. Модель процесса создания и издания картографической продукции // Геодезия и картография. 2022. № 1. С. 12–17. DOI:10.22389/0016-7126-2022-979-1-12-17.
 15. Чернов И.В., Якунин В.И. Модель процесса создания картографической продукции для решения задачи синтеза системы картографического производства // Геодезия и картография. 2023. № 2. С. 21–28. DOI:10.22389/0016-7126-2023-992-2-21-28.
 16. Колесников С.Ф., Сладкопепцев С.А., Луговской А.М. Проблемы и перспективы картографического обеспечения геоэкологии // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64, № 3. С. 298–304. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-298-304.
 17. Огуреева Г.Н., Бочарников М.В. Картографическое обеспечение работ по изучению ботанического разнообразия // География и природные ресурсы. 2024. Т. 45, № 3. С. 164–174. DOI:10.15372/GIPR20240316.

АВТОР **Логинов Дмитрий Сергеевич**

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

Поступила 22.01.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Cartographic Support of Scientific and Industrial Activities: National Experience, Periodization, and Current Issues

Dmitriy S. Loginov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 loginov@geohorizon.ru

CITATION Loginov DS. Cartographic Support of Scientific and Industrial Activities: National Experience, Periodization, and Current Issues. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 73–86. DOI:10.30533/GiA-2025-024.

KEYWORDS periodisation, cartographic support, bibliographic analysis, terminology

ABSTRACT Modern cartographic support is an important indicator of the demand for cartographic methods in solving applied problems of scientific and production activities with the help of digital cartographic products. The article presents the results of the bibliographic analysis of publications on the subject, carried out in the period from 1971 to 2025. The stages of the national cartographic support development of the late Soviet (1971–1991) and Russian (1991 – present) periods are identified and characterised. The time limits are set according to the statistical distribution of the number of publications and qualitative changes in the emergence of new types of digital cartographic products, means of their production and use. The results indicate the demand for preparation and use of cartographic materials for solving the problems of nature management, subsoil use and other activities. The problems of the unambiguous use of the term “cartographic support”, which contribute to the increase of the importance of other types of spatial data support, have been revealed. The need to scientifically substantiate the modern composition of the final results of cartographic support, and also to modernise and develop other approaches to understanding its essence has been established.

- REFERENCES**
1. Pljusnin VM, Vladimirov IN, Sorokovoj AA. Kartograficheskoe obespechenie territorial'nogo planirovaniya central'noj jekologicheskoy zony Bajkal'skoj prirodnoj territorii [Cartographic maintenance of territorial planning of the Central ecological zone of the Baikal natural territory]. *Geodesy and Cartography*. 2012;4: 22–31. (In Russian).
 2. Alekseenko NA, Arshinova SN. Kartograficheskoe obespechenie raboty nacional'nyh parkov Rossii [Cartographic Support of the Russian National Parks Activities].

- Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja*. 2012;1: 91–95. (In Russian). DOI:10.15356/0373-2444-2012-1-91-95.
3. Alekseenko NA. Metodicheskie osobennosti kartograficheskogo obespechenija prirodoohrannoj dejatel'nosti osobo ohranjaemyh prirodnyh territorij Rossii [Specific methodological features of cartographic support of the activities of nature protection areas in Russia]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografija*. 2014;1: 52–57. (In Russian).
 4. Bazhukova NV, Kiseleva ES, Tashkinova AN, et al. Kompleksnoe kartograficheskoe obespechenie uchebnogo kursa “Geografija Permskogo kraja” dlja vysshej shkoly [On providing the cartographic training for high school course “Geography of the Perm Region”]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2016;5: 3–7. (In Russian).
 5. Brovko EA, Sofinov RJe. Gosudarstvennyj topograficheskij monitoring: operativnoe kartograficheskoe obespechenie aktual'nymi prostranstvennymi dannymi hozjajstvennoj dejatel'nosti, oborony i nacional'noj bezopasnosti strany [State topographic monitoring: operational mapping maintenance of country's business, defense and national security with relevant spatial data]. *Geodesy and Cartography*. 2012;7: 45–51. (In Russian).
 6. Rotanova IN, Harlamova NF. *Turistsko-rekreacionnyj kompleks Altajskogo regiona: organizacija i informacionno-kartograficheskoe obespechenie* [Tourist and recreational complex of the Altai region: organization and information and cartographic support] [monograph]. Barnaul: AltSU; 2014. 212 p. (In Russian).
 7. Rotanova IN. Uslovnost' kart: tradicii i novacii [The conventionality of maps: traditions and innovations]. *From the maps of the past – to the maps of the future: proceedings of the international scientific and practical conference, Perm, Kudymkar, November 28–30, 2017*. In 3 vols. Perm': PSNRU; 2017(2): 158–168. (In Russian).
 8. Alekseenko NA. Aktual'nye voprosy kartograficheskogo obespechenija osobo ohranjaemyh prirodnyh territorij Rossii [Topical issues of cartographic supporting specially protected natural areas of Russia]. *Geodesy and Cartography*. 2019;1: 13–23. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-943-1-13-23.
 9. Nikolaeva ON. *Kartograficheskoe obespechenie racional'nogo prirodopol'zovanija regiona* [Cartographic support for the rational use of natural resources in the region] [monograph]. Novosibirsk: SSUGT; 2018. 170 p. (In Russian).
 10. Lur'e IK, Prohorova EA, Semin VN, et al. Razrabotka WEB-kartograficheskogo obespechenija jekologo-geograficheskoy ocenki razvitija territorii Novoj Moskvy [Provision of web-cartographic support for the ecological and geographical assessment of the New Moscow territory development]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografija*. 2017;5: 49–57. (In Russian).
 11. Snytko VA, Semenov JuM, Semenov MJu, et al. Ocenka prostranstvennoj i vremennej variabel'nosti sodержanija potencial'nyh zagraznitelej v vodah ozera Bajkal i ego pritokov [Assessment of spatial and temporal variability of potential pollutants in waters of lake Baikal and its tributaries]. *Geography: development of science and education*. In 2 vols. St. Petersburg: Asterion, Herzen State Pedagogical University; 2020;2: 114–117. (In Russian).
 12. Karmanova MV, Komissarova EV. Kartograficheskoe obespechenie organizacii operativnyh dejstvij v zone navodnenija na osnove operativnyh donesenij regional'nyh organov upravlenija v chrezvychajnyh situacijah [Cartographic support for the organization of operational actions in the flood zone on the basis of operational reports of regional management bodies in emergency situations]. *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”*. Moscow: MSU; 2021;27(1): 85–98. (In Russian). DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-85-98.
 13. Smirnov VN. Jeksperimental'naja proverka metodiki sozdaniya informacionnogo navigacionno-kartograficheskogo obespechenija dlja reshenija zadach nazemnoj navigacii [Experimental verification of the methodology for creating information navigation and cartographic support to solve ground navigation problems]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(5): 568–574. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-568-574.
 14. Chernov IV, Jakunin VI. Model' processa sozdaniya i izdaniya kartograficheskoy produkcii [Model of the process of creating and issuing cartographic products]. *Geodesy and Cartography*. 2022;1: 12–17. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2022-979-1-12-17.
 15. Chernov IV, Jakunin VI. Model' processa sozdaniya kartograficheskoy produkcii dlja reshenija zadachi sinteza sistemy kartograficheskogo proizvodstva [The process

- model of creating cartographic products for solving the task of a cartographic production system synthesis]. *Geodesy and Cartography*. 2023;2: 21–28. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2023-992-2-21-28.
16. Kolesnikov SF, Sladkopevcev SA, Lugovskoj AM. Problemy i perspektivy kartograficheskogo obespechenija geojekologii [Problems and prospects of mapping geoecology]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(3): 298–304. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-298-304.
17. Ogureeva GN, Bocharnikov MV. Kartograficheskoe obespechenie rabot po izucheniju botanicheskogo raznoobrazija [Geographical support of research work on the study of botanical diversity]. *Geography and Natural Resources*. 2024;45(3): 164–174. (In Russian). DOI:10.15372/GIPR20240316.

AUTHOR **Dmitriy S. Loginov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Visualization of Geodata and Cartographic Design, Faculty of Cartography
PhD in Engineering
 0000-0003-0853-1757

Submitted: January 22, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Разработка методики автоматизированного размещения подписей географических названий на мультимасштабной карте

А.П. Ефимова¹, С.А. Крылов¹✉

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ krylovs@miigaik.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Ефимова А.П., Крылов С.А. Разработка методики автоматизированного размещения подписей географических названий на мультимасштабной карте // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 87–98. DOI:10.30533/GiA-2025-056.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА мультимасштабная карта, географическое название, населенный пункт, объект гидрографии, цифровая картографическая основа

АННОТАЦИЯ Изучен и проанализирован опыт создания, размещения и оформления подписей на мультимасштабных картах. Схематично представлены разработанные общие и частные принципы конструирования и расположения таких подписей. В соответствии с указанными принципами предложена и поэтапно описана методика размещения подписей географических названий на мультимасштабной карте на примере создания подписей населенных пунктов и объектов гидрографии. Формирование подписей на масштабных уровнях карты рекомендуется проводить в последовательности от крупного масштаба к мелкому. Для населенных пунктов предлагается альтернативный подход, основанный на поочередном создании текстовых объектов по принципу укрупнения масштаба от самого мелкого масштаба карты, что позволит подписям наиболее значимых населенных пунктов занять наилучшее положение и сохранить его на всех масштабных уровнях. Предлагаемые подходы описаны на примере масштабного ряда, сформированного по принципу двукратного уменьшения масштаба. Рассмотрены особенности автоматизированного создания и размещения подписей географических названий на тематической мультимасштабной карте, где необходимо учитывать используемые способы картографического изображения объектов и явлений на каждом масштабном уровне. Предлагаемые методические решения позволят обеспечить корректное и согласованное размещение подписей названий населенных пунктов и объектов гидрографии на всех цифровых картографических основах мультимасштабной карты.

1 Введение

На сегодняшний день мультимасштабное картографирование является активно развивающимся направлением в картографии. Мультимасштабные карты широко используются в ГИС-проектах, на картографических веб-сервисах и в атласных информационных системах. При этом перспективное значение приобретают тематические мультимасштабные карты природной и социально-экономической направленности, отображающие совокупность тематических показателей, сочетание и способ картографического изображения которых зависят от конкретного масштабного уровня.

Одним из трудоемких процессов мультимасштабного картографирования является размещение пояснительных подписей и подписей географических названий. Основная сложность в размещении подписей на мультимасштабной карте заключается в том, что этот процесс нужно выполнять на каждом масштабном уровне. При уменьшении масштаба происходит изменение размеров подписей и самих объектов, что влияет на необходимость выбора другого местоположения подписи. Кроме того, может измениться тип локализации подписываемого объекта и, соответственно, принцип и математический аппарат конструирования подписи. Например, населенные пункты на крупных масштабах отображаются в виде полигональных контуров, на мелких — пунсонами. В первом случае подпись будет строиться относительно габарита объекта, во втором — относительно точечного объекта с учетом диаметра пунсона. Аналогичная ситуация возникает с площадными объектами гидрографии: на крупных масштабных уровнях подпись может располагаться внутри объекта, на мелких — только сбоку.

Отмеченные сложности влияют на методы, подходы и технологии в создании и размещении подписей, применяемые в настоящее время. При этом следует отметить, что нередко используемые решения не соответствуют картографическим принципам создания и размещения подписей. Так, на большинстве веб-картографических ресурсов размещение подписей населенных пунктов на крупных и средних масштабных уровнях осуществляется в центре полигонального объекта. Это позволяет однозначно определить подписанный населенный пункт. Однако в случае уменьшения масштаба подпись может перекрыть весь объект, что затруднит чтение карты. Кроме того, у подписей населенных пунктов, как правило, разным является только размер в соответствии с численностью жителей, в стиле подписи отсутствует различимость по политико-административному значению и типу поселения.

Можно отметить ряд научных работ [1–6], посвященных созданию и оформлению подписей на мультимасштабных картах. Так, в статье [1] рассматривается подход иерархического размещения подписей населенных мест (районов, населенных пунктов, предприятий и др.) на основе их предварительной классификации в информационной системе географических названий по следующим атрибутивным характеристикам: численности населения, количеству фирм, численности сотрудников и общему доходу экономических предприятий. Интерес для мультимасштабного картографирования представляет работа [2], где проведен анализ и определены этапы обобщения названий географических регионов, вершин и горных перевалов на разномасштабных картах справочных атласов; установлен приоритет подписывания горных хребтов и высокогорий над долинами и низменностями, а также горных вершин над перевалами; выявлены критерии для выбора названий, отображаемых на картах (высота объектов, географическое положение региона, транспортное сообщение и др.); отмечается проблема двойного наименования и выбора языка наименования трансграничных объектов. Для количественной оценки обобщения географических названий используются два показателя плотности наименований: количество названий на 1 дм² карты и на 10 000 (100 000) км² местности.

В работах [3–5] рассматриваются вопросы оформления подписей картографируемых объектов на мультимасштабной карте. Например, в статье [3] даны общие рекомендации по оформлению мультимасштабных общегеографических

Рис. 1 

Принципы создания подписей на мультимасштабных картах

Fig. 1

Principles of creating labels on multiscale maps

Общие принципы
Создание и размещение подписей на разных масштабных уровнях следует выполнять на основе сформированных таблиц отбора объектов в картографической базе данных, что обеспечит согласованность подписей при изменении масштаба карты
Порядок создания подписей внутри каждого слоя должен быть основан на значимости объектов, что позволит подписям важных и главных объектов занять наилучшие позиции
Стиль подписи и ее положение относительно подписываемого объекта должны по возможности сохраняться на разных масштабных уровнях карты
Присвоение стиля подписи для отображения требуемых характеристик выполняется на основе кода значимости объекта в картографической базе данных
Подписи создаются в виде текстовых объектов. Для предотвращения наложения подписей друг на друга и на объекты карты дополнительно создаются: прямоугольные объекты, описывающие подпись; буферные зоны вокруг объектов карты
Для каждого созданного текстового объекта в атрибутивную таблицу записывается следующая информация: данные о подписываемом объекте, параметры подписи и сведения о ее местоположении

Населенные пункты
Подписи названий населенных пунктов на каждом масштабном уровне должны обеспечивать их различимость по политико-административному значению, типу населенного пункта и количеству жителей
Подпись должна размещаться в оптимальной позиции (из восьми возможных) по отношению к условному обозначению (габариту) объекта в соответствии с установленным приоритетом и с учетом взаимосвязи с другими подписями и объектами карты

Объекты гидрографии
Подписи названий рек должны отражать характеристику «Судоходность»
Подписи объектов площадной гидрографии в зависимости от масштаба отображения и площади подписываемого объекта создаются либо внутри него, либо рядом с ним

карт. Применительно к подписям объектов отмечается следующее: при уменьшении масштаба их размер меняется медленнее, чем размер знаков. В части шрифтового оформления подписей населенных пунктов предлагается использовать шрифты без засечек, для поселков городского типа — прямое начертание подписи вместо курсивного, для отличия от городов — менее темный цвет букв, для подписей поселков сельского типа — как прямое, так и курсивное начертание (при этом светлоту начертания следует заменить с жирной на стандартную); в мелких масштабах, когда не показываются сельские населенные пункты, подписи городов следует давать в стандартном написании вместо полного заглавного, градации по численности жителей и политико-административному значению разделять соответственно светлотой начертания и светлотой цвета [3]. Среди зарубежных исследований, посвященных шрифтовому оформлению подписей, интерес представляют работы [4, 5], в которых рассматриваются вопросы выбора и построения шрифтов для разных категорий подписей (оронимов, гидронимов, ойконимов и др.) и различия в их отображении на разных масштабных уровнях карты. Автоматизированное подписывание географических объектов на веб-картографическом сервисе с открытым кодом Leaflet рассмотрено в статьях [6, 7]. Предлагается плагин, позволяющий отображать подписи на карте для любого векторного слоя в виде надписей-меток, при этом можно настраивать стиль и приоритет подписей. В плагине решаются задачи по автоматическому обобщению и отбору подписей, выявлению конфликтов между подписями и объектами внутри одного слоя, динамическому добавлению / удалению объектов карты в зависимости от результата подписывания.

Анализ исследований показал, что на сегодняшний день отсутствуют методические решения по автоматизированному созданию и размещению подписей картографируемых объектов на мультимасштабной карте. Таким образом, разработка соответствующей методики на примере географических названий населенных пунктов и объектов гидрографии представляется актуальной и важной для картографии задач.

2 Материалы и методы

Настоящее исследование базируется на концепции автоматизированного проектирования мультимасштабных карт, разработанной на кафедре картографии Московского государственного университета геодезии и картографии [8]. В соответствии с концепцией были предложены принципы создания и размещения подписей объектов на мультимасштабных картах (рис. 1).

Основная часть принципов относится к процессу конструирования подписей, куда входят следующие этапы: определение исходных данных, установление стиля подписей, выбор вида подписываемых объектов (населенные пункты, объекты гидрографии и т. п.), формирование семантической информации о параметрах подписей. Остальные принципы определяют, как размещать подписи, исходя из приоритетов и установленных правил. В верхней части схемы на рис. 1 приведены общие принципы, применяемые независимо от вида подписываемых объектов (населенных пунктов, объектов гидрографии, отметок высот и др.), в нижней части выделены принципы создания и размещения подписей населенных пунктов и элементов гидрографии как объектов, на которые приходится большая доля подписей на картах.

Разработанная методика основывается на использовании математического и информационного обеспечения системы автоматизированного создания подписей на картах.

Математическое обеспечение включает себя как формулы по вычислению координат точек привязки подписи и угла поворота, так и алгоритмы по конструированию подписей. В работе [9] частично рассматриваются вопросы, относящиеся к математическому обеспечению создания и размещения подписей. Информационное обеспечение содержит картографическую базу данных; систему классификации и кодирования объектов; базу знаний существующих правил размещения подписей; таблицы отбора объектов для каждого масштабного уровня; базу топологических отношений объектов. Диапазон масштабов зависит от картографируемой территории. Масштабный ряд создаваемой мультимасштабной карты может быть сформирован: по принципу двукратного уменьшения, на основе традиционного масштабного ряда, путем произвольного выбора пользователя [8]. В качестве исходных данных для автоматизированного размещения подписей используются цифровые картографические основы (ЦКО) масштабов 1 : 100 000, 1 : 1 000 000, 1 : 2 500 000 и сформированные таблицы отбора населенных пунктов и объектов гидрографии.

3 Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлен проект методики создания и размещения подписей названий населенных пунктов и объектов гидрографии на мультимасштабной карте. Методика состоит из трех этапов. Рассмотрим каждый из них подробнее.

Этап 1. Определение параметров конструирования и размещения подписей географических названий

На первом этапе определяются и настраиваются параметры конструирования и размещения текстовых объектов. Для построения подписей необходимо выбрать шрифт, его начертание и размер в соответствии с классификацией объектов. Например, для населенных пунктов подчеркивание подписи зависит от их политико-административного значения, шрифт и начертание подписи — от типа населенного пункта, размер — от численности жителей. Объекты гидрографии обычно подписываются одним шрифтом, чаще всего Vm431 с применением курсива для всех объектов. В зависимости от характеристики «Судоходность» устанавливаются заглавные или строчные буквы.

В связи с тем, что создание подписей на мультимасштабной карте происходит на основе таблицы отбора, объекты, относящиеся к разным классификационным группировкам (например, города, поселки городского типа и т. п.), не должны находиться на разных слоях. Для однозначной идентификации объекта в картографической базе данных желательно, чтобы для каждого элемента содержания был предусмотрен код значимости объекта. В зависимости от использованного метода классификации код значимости может быть основан либо на последовательном, либо на параллельном методе кодирования.

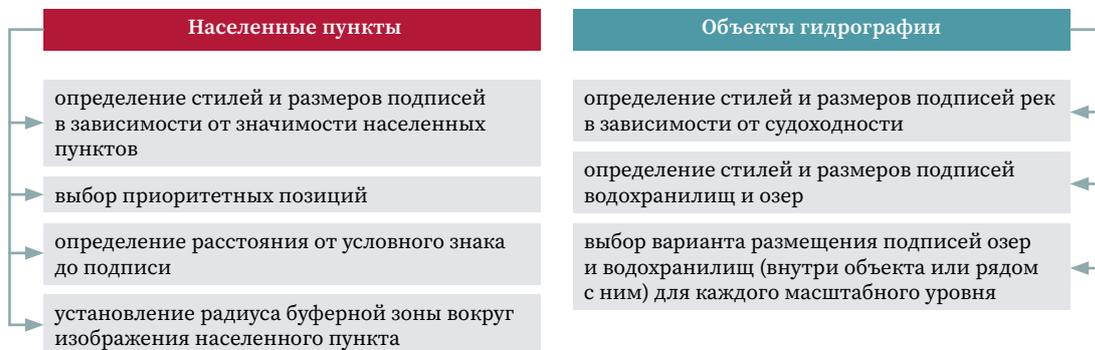
Рис. 2 

Методика создания и размещения подписей географических названий на мультимасштабной карте (на примере населенных пунктов и объектов гидрографии)

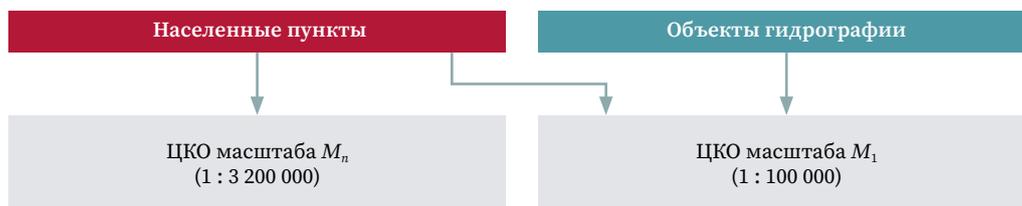
Fig. 2

The methodology for creating and placing geographical name labels on a multi-scale map (using populated areas and hydrographic features as examples)

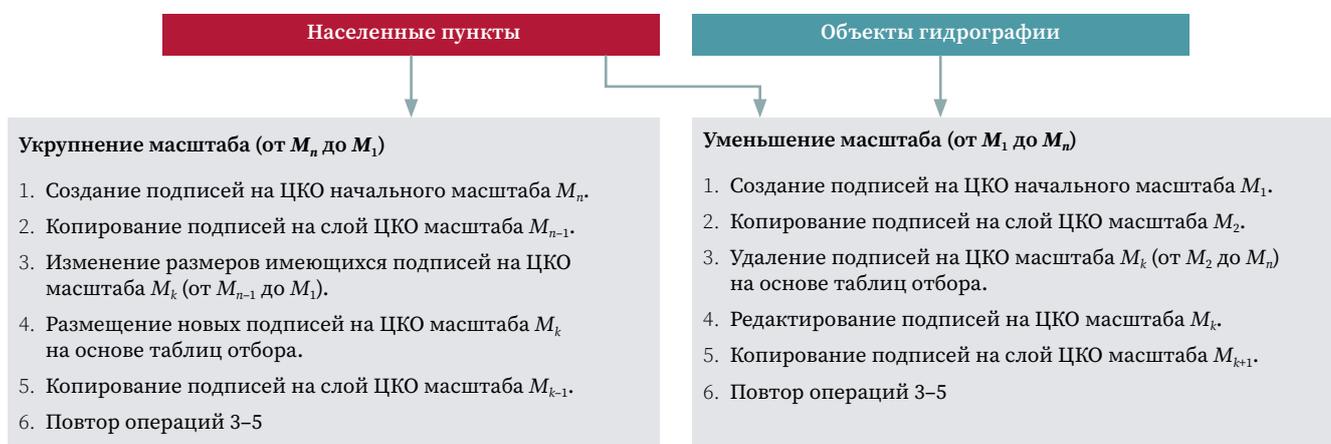
Этап 1. Определение параметров конструирования и размещения подписей географических названий



Этап 2. Выбор ЦКО начального масштаба для создания подписей



Этап 3. Формирование подписей на ЦКО



Результат



Так, в картографической базе данных, используемой при апробации данной методики, для населенных пунктов применяется фасетная классификация, соответственно параллельный метод кодирования, для объектов гидрографии — иерархическая классификация и последовательный метод кодирования [10, 11]. Значимость и характеристики объекта, относящегося к населенным пунктам или элементам гидрографии, определяются пятизначным кодом. Для населенных пунктов первая цифра кода определяет классификационную группу 4 «Населенные пункты», вторая (4#000) — политико-административное значение, третья (40#00) — тип населенного пункта, четвертая (400#0) — градацию по численности жителей, пятая (4000#) — градацию по площади населенного пункта. Для объектов гидрографии первая цифра кода определяет классификационную группу 3 «Гидрография и гидротехнические сооружения», вторая (3#000) — элемент гидрографии, третья (30#00) — характеристики, четвертая (300#0) — параметры, пятая цифра кода равна нулю, т. к. на этом уровне отсутствует признак классификации.

Следует отметить, что единый код значимости может быть заменен значениями отдельных характеристик, влияющих на вид и размер подписи и хранящихся в отдельных полях таблицы.

Для размещения названий в зависимости от вида подписываемых объектов выбираются приоритетные позиции. Так, для населенных пунктов возможно размещение в восьми позициях вокруг пунсона или габарита объекта по часовой стрелке от первой на северо-востоке до восьмой на севере. Приоритет каждой позиции устанавливается путем указания порядка размещения (от 1 до 8). Например, в позиции с порядком размещения 1 при отсутствии пересечений с другими подписями и объектами подписи будут размещаться в первую очередь, затем в позиции с порядком размещения 2 и т. д. При этом приоритетные позиции для подписей населенных пунктов устанавливаются один раз и будут использоваться на всех масштабных уровнях карты. Для площадных объектов гидрографии (озер, водохранилищ и т. п.) подписи размещаются по горизонтальной прямой и могут находиться как внутри объекта, так и за его пределами. Во втором случае следует предусмотреть выбор приоритетных позиций по аналогии с населенными пунктами. Для линейных рек создание подписей названий происходит по наклонной прямой или по сплайну.

К параметрам размещения подписей во избежание их наложения на объекты карты также относятся: расстояние сдвига текстового объекта от контура или пунсона населенного пункта; радиус буферной зоны вокруг населенных пунктов и площадных объектов гидрографии.

Этап 2. Выбор ЦКО начального масштаба для создания подписей

Под начальным масштабом понимается масштабный уровень карты, где происходит первоначальное создание и размещение подписей, которые в дальнейшем будут использоваться для формирования подписей на других масштабных уровнях. Как правило, начальный масштаб совпадает с наиболее крупным масштабом карты, данные которого используются в качестве основы для формирования таблиц отбора объектов на ЦКО более мелких масштабов. В рассматриваемой методике это масштаб 1 : 100 000 (M_1). В этом случае речь идет о последовательном отборе и изменении положения подписей объектов с уменьшением масштаба карты от M_1 до M_n (например, на ЦКО масштабов 1 : 200 000, 1 : 400 000 и т. д.). При создании подписей объектов гидрографии этот подход является единственным, т. к. они формируются после подписей населенных пунктов на свободных местах и на ЦКО крупных масштабов могут располагаться внутри объекта. В данном случае не так важно сохранение местоположения подписей на всех масштабных уровнях, при этом на мелкомасштабных уровнях карты очень мало объектов гидрографии, имеющих подпись.

Однако для населенных пунктов, помимо варианта с уменьшением масштаба, следует рассмотреть и альтернативный подход, когда исходные подписи создаются на основе таблицы отбора населенных пунктов для самого мелкого масштаба M_n . В этом случае под начальным масштабом понимается наиболее мелкий масштабный уровень карты (например, соответствующий масштабу

1 : 3 200 000) и дальнейшее создание подписей идет по принципу укрупнения масштаба от M_n до M_1 . Такой подход позволит подписям наиболее значимых населенных пунктов занять наилучшее положение и сохранить его на всех масштабных уровнях. В варианте с уменьшением масштаба так не получится, потому что происходит увеличение графической нагрузки карты и, соответственно, значительное сокращение свободного места. В этом случае подписи, занявшие лучшее положение на ЦКО масштаба 1 : 100 000, могут не поместиться в эту же позицию на более мелких масштабных уровнях.

В дальнейшем после разработки и апробирования программного комплекса будет проведена оценка эффективности предложенных подходов к размещению подписей населенных пунктов, которая заключается в создании образцов карт, а также в получении и сравнении статистических данных по фактическому местоположению подписей. В итоге будет выбран подход, дающий наилучшие результаты.

Этап 3. Формирование подписей на ЦКО

Данный этап подразумевает последовательное создание подписей географических названий на ЦКО всего масштабного ряда в соответствии с одним из двух вариантов: от крупного масштаба к мелкому (для населенных пунктов и объектов гидрографии) или от мелкого масштаба к крупному (только для населенных пунктов).

В первом случае при уменьшении масштаба от M_1 до M_n сначала создаются и размещаются подписи названий населенных пунктов и объектов гидрографии на ЦКО масштаба M_1 (1 : 100 000) в соответствии с выбранными параметрами. Полученный результат копируется в отдельный слой для следующего масштабного уровня (масштаб M_2), на котором происходит удаление ненужных подписей на основе таблиц отбора объектов для данного масштаба. Затем на этом же слое для оставшихся подписей выполняется сначала изменение размеров, а при необходимости и перемещение в новую позицию из-за выявленных конфликтов с другими названиями или объектами географической основы. Операция повторяется для каждого масштаба выбранного масштабного ряда мультимасштабной карты до M_n включительно (рис. 3).

Рис. 3  Формирование подписей названий населенных пунктов и объектов гидрографии на ЦКО в последовательности от крупного масштаба к мелкому (на примере двукратного уменьшения масштабов)

Fig. 3 Formation of signatures of names of settlements and hydrographic objects based on digital cartographic bases in the sequence from large to small scale (using the example of a two-fold scale reduction)

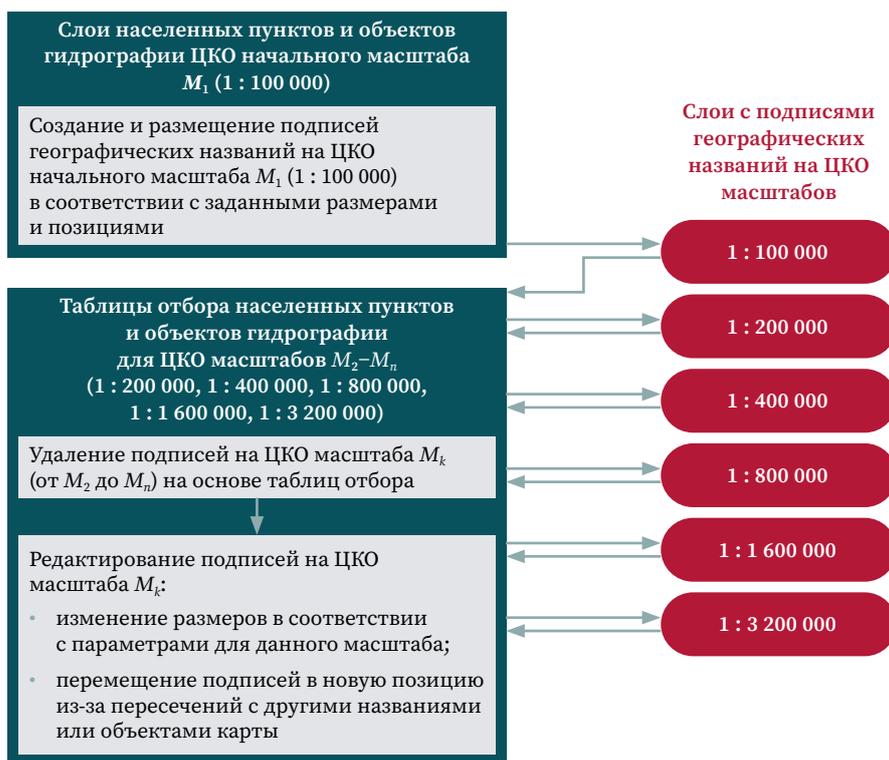


Рис. 4 

Формирование подписей названий населенных пунктов на ЦКО в последовательности от мелкого масштаба к крупному (на примере двукратного уменьшения масштабов)

Fig. 4

Formation of signatures of names of settlements based on digital cartographic bases in sequence from small scale to large scale (using the example of a two-fold reduction in scale)



Второй вариант формирования подписей населенных пунктов на ЦКО (рис. 4) выполняется в последовательности от самого мелкого масштаба (M_n) до самого крупного (M_1). Вначале размещаются подписи на ЦКО масштаба M_n . Далее полученные подписи копируются в слой для масштабного уровня M_{n-1} , на котором происходит сначала изменение размеров имеющихся подписей, а затем добавление новых подписей на основе таблиц отбора населенных пунктов для данного масштаба и в соответствии с установленными параметрами конструирования и размещения. Эта операция выполняется для всех ЦКО масштабного ряда. Следует отметить, что в данном варианте требуется разместить только новые подписи, при этом случаи изменения позиций существующих подписей из-за увеличения их размера будут довольно редки.

В результате для каждого масштабного уровня будут получены слои, содержащие текстовые объекты названий населенных пунктов и объектов гидрографии. В атрибутивной таблице к каждому слою будет содержаться информация о подписываемом объекте, сведения о параметрах шрифта и местоположении подписи. В дальнейшем эта семантическая информация может быть использована для визуализации подписей как на веб-картах, так и в тех геоинформационных системах, где подписи создаются в виде немасштабируемых надписей — меток (*англ. labels*) — на основе семантических характеристик объектов [8].

Отдельно стоит рассмотреть особенности автоматизированного создания и размещения подписей географических названий на тематической мультимасштабной карте, где необходимо учитывать используемые способы картографического изображения объектов и явлений на каждом масштабном уровне. Наибольшее влияние на процесс размещения текстовых объектов оказывают способ значков и способ картодиаграмм. В первом случае подпись объекта (например, название населенного пункта) необходимо сдвигать относительно значка. Следует также проверять размещение других подписей на предмет их пересечений с тематическими значками. Во втором случае требуется проверять пересечение существующих подписей и картодиаграмм и при необходимости редактировать их местоположение. В зависимости от используемых параметров условных знаков (размер, цвет, форма и т. п.) на размещение подписей могут влиять способы знаков движения и ареалов. Способы картографического изображения с фоновой окраской, такие как картограмма, качественный и количественный фон, не оказывают влияния на размещение подписей.

Можно выделить два варианта создания подписей на тематической мультимасштабной карте:

- 1) первоначальное создание подписей на общегеографической карте и последующая их корректировка с учетом отбора объектов географической

- основы и используемых способов картографического изображения тематического содержания (в случае способа значков речь идет о сдвиге подписи относительно нового размера значка и о возможной смене позиций подписей; при способе картодиаграмм происходит только корректировка позиций подписей или самой картодиаграммы);
- 2) создание подписей непосредственно на тематической карте (в этом случае подписи размещаются на карте с тематическим содержанием с учетом особенностей каждого способа изображения: например, для значков учитывается расстояние сдвига от центра объекта и пересечение с любыми объектами, для картодиаграммы — наличие пересечений тематического знака с подписями).

4 Выводы

Предлагаемая методика позволит обеспечить корректное и согласованное размещение подписей названий населенных пунктов и объектов гидрографии на всех масштабных уровнях мультимасштабной карты. При этом подписи будут располагаться в наилучших позициях в зависимости от значимости подписываемого объекта и установленных приоритетов с сохранением по возможности одного местоположения на всех ЦКО карты. На основе предлагаемых методических решений будет разработан программный комплекс по формированию для каждого масштаба карты слоев с текстовыми объектами, атрибутивная информация которых может быть использована для визуализации подписей в ГИС-проектах различного программного обеспечения и на картографических веб-сервисах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № FSFE-2023-0005 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Butzler S., Brewer C., Stroth W. Establishing Classification and Hierarchy in Populated Place Labeling for Multiscale Mapping for The National Map // *Cartography and Geographic Information Science*. 2011. Vol. 38. Iss. 2. P. 100–109. DOI:10.1559/15230406382100.
2. Michna I. Generalization of geographical names on atlas maps // *Proceedings of 24th International Cartographical Conference*. Santiago, November 15–21, 2009. Santiago: IGU, 2009. P. 1–10.
3. Подольский А.С., Самсонов Т.Е. Принципы оформления мультимасштабных общегеографических карт // *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС»*. Смоленск: СмолГУ, 2012. С. 71–81.
4. Biniek S., Touya G., Rouffineau G. Fifty shades of Roboto: Text Design Choices and Categories in Multi-Scale Maps // *Advances in Cartography and GIScience of the ICA*. 2019. Vol. 1. Iss. 2. P. 1–8. DOI:10.5194/ica-adv-1-2-2019.
5. Biniek S., Touya G., Rouffineau G., et al. Designing typefaces for maps. A protocol of tests // *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2018. Vol. 1. Iss. 9. P. 1–5. DOI:10.5194/ica-proc-1-9-2018.
6. Gede M. Auto-generalized labels on multi-layer Leaflet maps // *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2025. Vol. 7. Iss. 2. P. 1–5. DOI:10.5194/ica-proc-7-2-2025.
7. Gede M. Automatic Labels in Leaflet // *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2023. Vol. 4. Iss. 8. P. 1–5. DOI:10.5194/ica-adv-4-8-2023.
8. Крылов С.А., Загребин Г.И., Котова О.И. и др. Автоматизация процессов проектирования мультимасштабных карт: концептуальные основы и решения // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2023. Т. 67, № 6. С. 6–20. DOI:10.30533/GiA-2023-063.
9. Агапов В.С. Разработка методик формирования и использования представительного справочно-информационного фонда географических названий: дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 177 с.

10. Дворников А.В., Загребин Г.И., Афанасьев А.Н. Решение проблемы качественного отбора населенных пунктов при автоматизированном мелкомасштабном картографировании // Приложение к журналу «Известия вузов “Геодезия и аэрофотосъемка”». 2014. № 7-1. С. 129–132.
11. Иванов А.Г. Разработка методов и технологий автоматизации процессов комплексного проектирования и использования мелкомасштабных карт: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2003. 339 с.

АВТОРЫ **Ефимова Анна Павловна**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра картографии, картографический факультет
 0000-0002-0097-3705

Крылов Сергей Анатольевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра картографии, картографический факультет
канд. техн. наук
 0000-0002-5879-6502

Поступила 02.10.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Development of a Methodology for the Rapid Placement of Geographical Name Labels on a General Geographic Multi-Scale Map

Anna P. Efimova¹, Sergey A. Krylov¹ 

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 krylovs@miigaik.ru

CITATION Efimova AP, Krylov SA. Development of a Methodology for the Rapid Placement of Geographical Name Labels on a General Geographic Multi-Scale Map. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 87–98. DOI:10.30533/GiA-2025-056.

KEYWORDS multi-scale map, place name, settlement, hydrography object, digital cartographic base

ABSTRACT The experience of creating, placing, and formatting signatures on multiscale maps has been studied and analyzed. The developed general and specific principles of designing and placing object signatures on a multiscale map are schematically presented. In accordance with the developed principles, a method for placing geographical name signatures on a multiscale map is proposed. The stages of the methodology are described in detail using the example of creating signatures of settlements and hydrographic objects. It is recommended that signatures be formed at the scale levels of the map in a sequence from large scale to small scale. For localities, an alternative approach is proposed based on the alternate creation of text objects based on the principle of scaling up from the smallest scale of the map, which will allow the signatures of the most significant localities to occupy the best position and preserve it at all scale levels. A description of the proposed approaches to the formation of signatures is presented using the example of a scale series formed on the principle of a two-fold scale reduction. The features of automated creation and placement of geographical name signatures on a thematic multiscale map are considered, where it is necessary to take into account the methods used to map objects and phenomena at each scale level. The proposed methodological solutions will ensure the correct and consistent placement of signatures of names of settlements and hydrographic objects on all digital cartographic bases of a multiscale map.

ACKNOWLEDGEMENTS This work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FSFE-2023-0005.

- REFERENCES**
1. Butzler S, Brewer C, Stroh W. Establishing Classification and Hierarchy in Populated Place Labeling for Multiscale Mapping for The National Map. *Cartography and Geographic Information Science*. 2011;38(2): 100–109. DOI:10.1559/15230406382100.
 2. Michna I. Generalization of geographical names on atlas maps. *Proceedings of 24th International Cartographical Conference. Santiago, November 15–21, 2009*. Santiago: IGU; 2009: 1–10.
 3. Podolskiy AS, Samsonov TE. Principy oformleniya mul'timasshtabnyh obshchegeograficheskikh kart [Principles of designing multi-scale geographical maps]. *Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS"*. Smolensk: Smolensk State University; 2012: 71–81. (In Russian).
 4. Biniek S, Touya G, Rouffineau G. Fifty shades of Roboto: Text Design Choices and Categories in Multi-Scale Maps. *Advances in Cartography and GIScience of the ICA*. 2019;1(2): 1–8. DOI:10.5194/ica-adv-1-2-2019.
 5. Biniek S, Touya G, Rouffineau G, et al. Designing typefaces for maps. A protocol of tests. *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2018;1(9): 1–5. DOI:10.5194/ica-proc-1-9-2018.
 6. Gede M. Auto-generalized labels on multi-layer Leaflet maps. *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2025;7(2): 1–5. DOI:10.5194/ica-proc-7-2-2025.
 7. Gede M. Automatic Labels in Leaflet. *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2023;4(8): 1–5. DOI:10.5194/ica-adv-4-8-2023.
 8. Krylov SA, Zagrebin GI, Kotova OI, et al. Avtomatizaciya processov proektirovaniya mul'timasshtabnyh kart: konceptual'nye osnovy i resheniya [Automation of multiscale map design processes: conceptual foundations and solutions]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2023;67(6): 6–20. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-063.
 9. Agapov VS. *Razrabotka metodik formirovaniya i ispol'zovaniya predstavitel'nogo spravochno-informacionnogo fonda geograficheskikh nazvanij* [Development of methods for the formation and use of a representative reference and information fund of geographical names] [dissertation]. Moscow; 2003. 177 p. (In Russian).
 10. Dvornikov AV, Zagrebin GI, Afanasyev AN. Reshenie problemy kachestvennogo otbora naselennykh punktov pri avtomatizirovannom melkomasshtabnom kartografirovanii [Solving the problem of qualitative selection of settlements in automated small-scale mapping]. *Prilozhenie k zhurnalu "Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying"*. 2014;7(1): 129–132. (In Russian).
 11. Ivanov AG. *Razrabotka metodov i tehnologij avtomatizacii processov kompleksnogo proektirovaniya i ispol'zovaniya melkomasshtabnykh kart* [Development of methods and technologies for automating the processes of integrated design and the use of small-scale maps] [dissertation]. Moscow; 2003. 339 p. (In Russian).

AUTHORS **Anna P. Efimova**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Cartography, Faculty of Cartography
 ID 0000-0002-0097-3705

Sergey A. Krylov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Cartography, Faculty of Cartography
 PhD in Engineering
 ID 0000-0002-5879-6502

Submitted: October 02, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с высокими и компромиссными оптическими характеристиками

И.А. Боголюбов¹, А.А. Лобанов²✉, Г.А. Можаров³

¹ Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

³ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

✉ aa.lobanoff@ya.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Боголюбов И.А., Лобанов А.А., Можаров Г.А. Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с высокими и компромиссными оптическими характеристиками // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 99–114. DOI:10.30533/GiA-2025-048.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА корреляционный пеленгатор, объектив, окуляр, качество изображения, система технического зрения

АННОТАЦИЯ В статье предложена оптическая схема и выполнен детальный расчет параметров объектива с высокими оптическими характеристиками, предназначенного для корреляционного некогерентного четырехканального пеленгатора. Разработанное решение реализуемо на базе доступных материалов и современных технологий производства оптики. Однако достижение высоких оптических характеристик (высокого разрешения, минимальных аберраций и широкого поля зрения) потребовало значительного числа ресурсоемких элементов, что усложняет практическую реализацию. В связи с этим дополнительно исследована возможность компромиссного повышения оптических характеристик объектива для оптического корреляционного пеленгатора с учетом экономически оправданных схем, материалов и стандартных оптических элементов. В рамках расчета компромиссных вариантов предложены и обоснованы две альтернативные оптические схемы: первый вариант основан на известном окуляре Государственного оптического института (ГОИ) с модификацией для пеленгации, второй — на единичном параболическом зеркале с упрощенной конструкцией. Выполнены численные расчеты с использованием специализированного программного обеспечения, описаны ключевые параметры предложенных

объективов (фокусное расстояние, апертура, коэффициент передачи), а также ограничения применения (чувствительность к вибрациям, температурные эффекты). Полученные результаты позволяют создать как объектив с высокими оптическими характеристиками для некогерентного корреляционного пеленгатора, так и компромиссный вариант для практических исследований корреляционного сигнала в реальных условиях, что способствует развитию доступных систем пеленгации.

1 Введение

Системы оптической навигации востребованы в перспективных космических миссиях, которые предполагают посадку на небесные тела Солнечной системы. Анализ предметной области показывает, что практически все уже выполненные и перспективные миссии с посадкой на небесные тела использовали в процессе приповерхностной навигации и посадки сложные оптические системы и комплексы. Необходимость применения систем оптической навигации объясняется высокими требованиями к точности посадки космического летательного аппарата (КЛА) и высокой эффективностью полученных результатов.

Таким образом, оптические системы навигации и посадки де-факто стали неотъемлемой частью бортового оборудования космических аппаратов. Иностранные специалисты делают упор на увеличение мощности бортовых вычислительных ресурсов и использование алгоритмов распознавания образов¹ [1–5]. Отечественные ученые разрабатывают сценарии применения оптических систем, которые менее требовательны к бортовым вычислительным ресурсам КЛА [6–12]. Однако в рамках российских исследований также используются бортовые вычислительные ресурсы для вычисления корреляции в электронном тракте.

Предлагаемая авторами система с корреляцией в оптическом тракте [13] позволяет значительно уменьшить требования к вычислительным ресурсам на борту. Оригинальная схема оптического четырехканального пеленгатора дает возможность создать перспективные быстродействующие высокопроизводительные устройства обработки пространственной информации. Однако разработка для такого пеленгатора объектива с высокими оптическими характеристиками является самостоятельной научно-технической задачей.

Цель настоящей статьи — выбор оптической схемы и расчет показателей объектива оптического корреляционного пеленгатора (ОКП) с высокими и компромиссными оптическими характеристиками. Задачи исследования были сформулированы следующим образом:

- найти оптическую схему и сконструировать объектив с высокими оптическими характеристиками;
- на основании найденного решения исследовать возможность применения существующих отработанных оптических схем для увеличения технологичности и снижения трудоемкости производства объективов;
- исследовать параметры выбранных компромиссных объективов и оптимизировать начальные варианты с добавлением свободных параметров в системе автоматизированного проектирования (САПР) [14].

В процессе работы была предложена оптическая схема, которая обеспечивает высокие оптические характеристики. Такой объектив позволит реализовать потенциал ОКП полностью. Однако для обеспечения высоких характеристик объектива в расчетах были использованы материал и элементы, которые являются

¹ Adams E., Chabot N., Cheng A., et al. Final Technical Report to the National Aeronautics and Space Administration for the Double Asteroid Redirection Test (DART) Mission. October 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230015804/downloads/DART%20Final%20Technical%20Report.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).

весьма ресурсоемкими. Применение таких элементов не всегда бывает оправданным. Открытым, в частности, является вопрос их деградации в условиях длительного космического полета.

Объектив предназначен для системы обеспечения навигации космического аппарата и его посадки на малые тела Солнечной системы. Учитывая ранее изложенное, было решено разработать и рассчитать объектив, построенный на более распространенных и доступных элементах, оптические характеристики которого, однако, отвечали бы требованиям полнофункциональной работы пеленгатора.

2 Материалы и методы

Рассматривая пути дальнейшего повышения оптических характеристик объектива пеленгатора, авторы руководствовались следующими соображениями: диаметр входного зрачка ОКП влияет на количество световой энергии, обрабатываемой коррелятором, и отношение сигнал / шум корреляционного пика в электронном тракте. В условиях космического пространства при работе на большом удалении объекты представляют собой точечные излучатели. Работа ОКП по точечному объекту принципиально возможна, однако ее целесообразность сомнительна, т. к. существуют другие способы навигации. Повышение диаметра входного зрачка ОКП представляется более актуальным для наземных задач, обеспечения работы по земной поверхности в условиях слабой освещенности в ночных условиях.

Угловое поле ОКП целесообразно повышать для обеспечения точной ориентации при работе на малых дальностях, т. к. ослабляется влияние внешних факторов, приводящих к нестабильности работы корреляционного алгоритма, таких как дрожание, непостоянство масштаба изображения и ракурсные искажения объекта.

Чем выше качество изображения объектива, тем более высокие пространственные частоты могут давать больший вклад в корреляционный сигнал, следовательно, ОКП может работать по рельефу поверхности с меньшими неоднородностями. В идеальном случае линейное разрешение объектива ОКП должно быть согласовано с размером зоны управления цифрового эталона (УЦЭ) [15], а качество изображения объектива должно быть дифракционно ограниченным.

На практике представляет интерес расчет оптической системы ОКП с повышением как всех оптических характеристик, так и каждой в отдельности, приводящий к компромиссным схемотехническим решениям. По мнению авторов, главный интерес представляет расчет оптических систем ОКП с повышенным полем и расширенным спектральным диапазоном.

Таблица 1 

Оптические характеристики объектива пеленгатора

Table 1

Optical characteristics of the bearing finder objective lens

	D / f'	$2\omega, ^\circ$
1	1 : 0,5	90
2	1 : 1	53
3	1 : 2	28
4	1 : 4	14

2.1 Корреляционный объектив с высокими оптическими характеристиками

В работе М.М. Русинова² с использованием алгебраического метода расчета был получен корреляционный объектив со средними оптическими характеристиками (табл. 1, строка 3; рис. 1). Подход, предложенный ученым, актуален [16].

Для перехода к характеристикам, приведенным в строке 2 табл. 1, в оптическую систему необходимо добавить свободные параметры. Исходя из схемы на рис. 1, делаем вывод, что система аналогична базовой системе из двух плоско-выпуклых линз² и менисков, корректирующих кривизну изображения. Следует заметить, однако, что параметры менисков в данном случае делают

² Русинов М.М. Композиция оптических систем. 2-е изд. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 382 с.

их сложными в изготовлении. Особенностью рассматриваемой системы является хорошая коррекция хроматизма без использования склеенных поверхностей благодаря применению кристаллических материалов с существенно различающимися показателями дисперсии. Ранее было показано, что объектив корреляционного пеленгатора должен строиться по схемам, близким к схемам симметричных окуляров с высокой степенью коррекции сферической аберрации. Исходя из этого предположения, сделаем центральные линзы плоско-выпуклыми и добавим коэффициенты деформации на выпуклые поверхности для обеспечения лучшей коррекции сферической аберрации. Будем оптимизировать систему на меньшее фокусное расстояние одновременно с увеличением углового поля. Оптимизация в САПР привела к схеме корреляционного объектива, изображенного на рис. 2.

В полученном объективе на асферических поверхностях применен один коэффициент деформации. Коррекция хроматизма неидеальна также из-за отсутствия склеенных поверхностей.

Полученный корреляционный объектив и построенный на его основе ОКП будет иметь высокие оптические характеристики, а следовательно, может применяться в тех случаях, когда невозможен компромисс между угловым полем и дальностью работы. Конструкция ОКП состоит из четырех групп одинаковых двухлинзовых компонентов с одной плоской и одной асферической поверхностью, что является сравнительно технологичным решением.

Рис. 1 

Схема объектива корреляционного пеленгатора со средними оптическими характеристиками и график кривизны поля, характеризующий качество изображения

Fig. 1

Diagram of the correlation objective lens with average optical characteristics and graph of field curvature characterizing its image quality

Схема корреляционного объектива с характеристиками 3 (табл. 1), фокусным расстоянием 30 мм, спектральным диапазоном 0,8–1,0 мкм / Diagram of the correlation objective lens with characteristics No. 3 (Table 1), focal length 30 mm, spectral range 0.8–1.0 μm

График кривизны поля, характеризующий качество изображения корреляционного объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the correlation objective lens

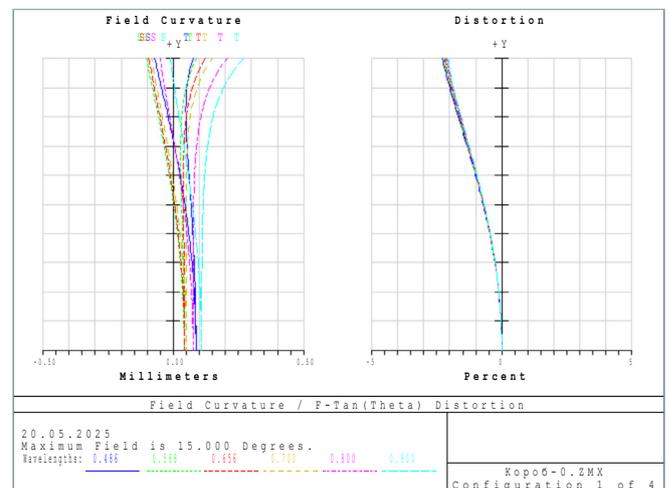
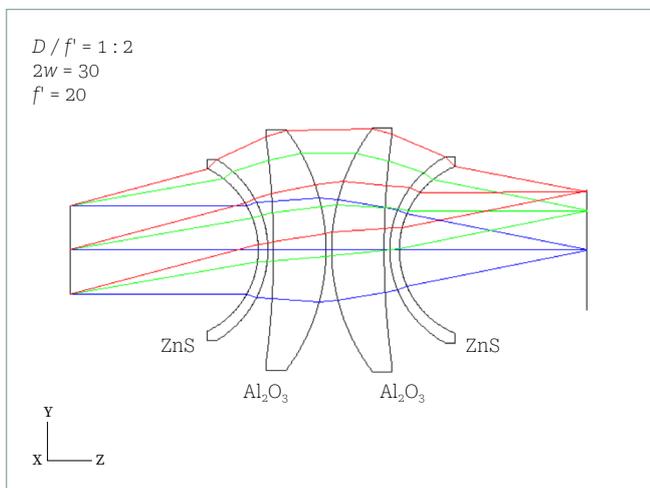


Рис. 2

Корреляционный объектив ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и функции передачи модуляции (ФПМ)

Fig. 2

Correlation objective lens of the optical correlation direction finder: design diagrams, field curvature, and modulation transfer functions (MTF)

Схема корреляционного объектива с характеристиками 2 (табл. 1), фокусным расстоянием 15 мм, спектральным диапазоном 0,8–1,0 мкм / Diagram of the correlation objective lens with characteristics No. 2 (Table 1), focal length 15 mm, spectral range 0.8–1.0 μm

График кривизны поля, характеризующий качество изображения корреляционного объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the correlation objective lens

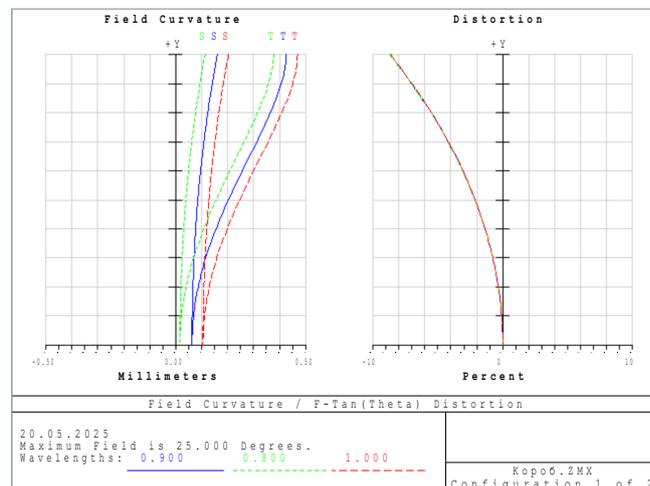
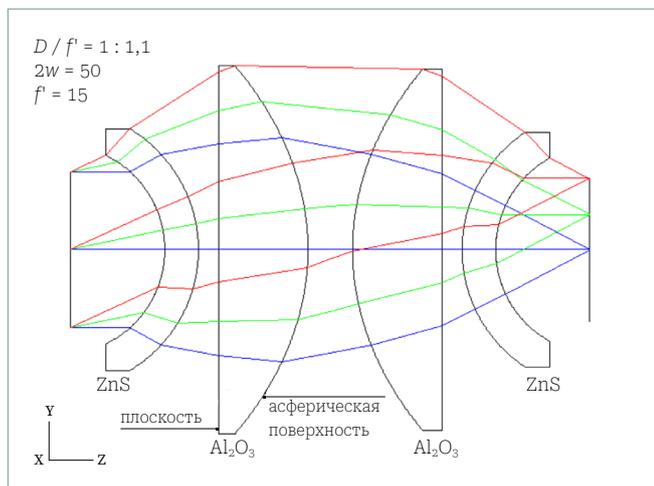
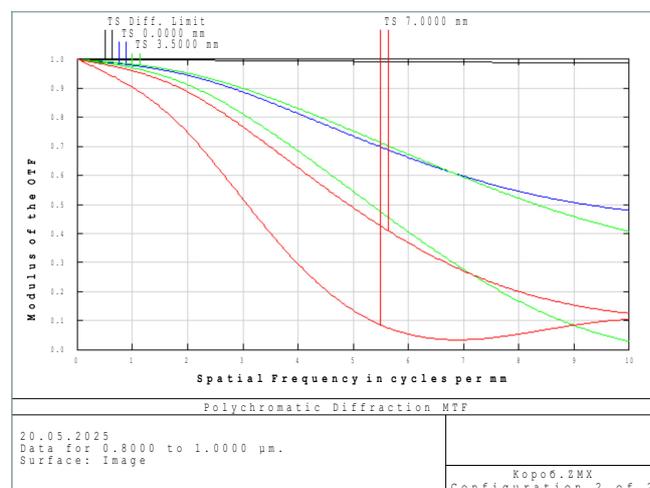
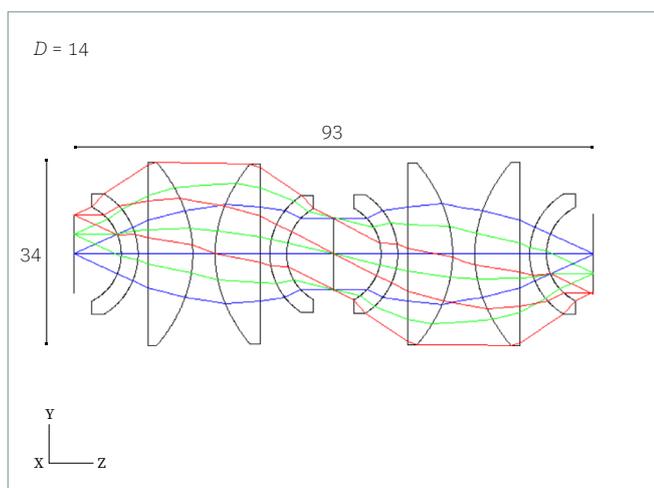


Схема ОКП на основе корреляционного объектива / Diagram of the optical correlation direction finder based on the correlation objective

График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical correlation direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



2.2 ОКП на основе известных окуляров

В работе [15] было показано, что оптимальная конструкция объектива для ОКП во многом схожа с конструкцией окуляров. Особенности оптической схемы окуляров являются вынесенный примерно на 4 мм входной зрачок и угловое поле в диапазоне 45–90°. Схемы симметричных и близких к ним окуляров хорошо изучены и распространены, подобраны оптимальные материалы линз для компенсации хроматических aberrаций, ход главного луча может быть близок к телецентрическому. В связи с этим весьма рациональным представляется решение рассмотреть возможность создания ОКП на основе таких окуляров.

В отдельных работах³ приведен ряд сравнительно новых схем окуляров, которые не представлены в каталогах и используются [17–19] в настоящее время. Рассмотрим схемы ОКП на основе шестилинзового окуляра Государственного оптического института (ГОИ) и пятилинзового окуляра Эрфле. Схемы этих окуляров являются развитием схемы симметричного окуляра Плоссея. В окуляре ГОИ повышена технологичность за счет использования двух плоских поверхностей и четырех поверхностей с равными радиусами, отсутствуют асферические поверхности. Конструкция очень близка к симметричной и также принципиально близка к схеме предыдущего объектива (рис. 2). Относительное отверстие составляет 1 : 4,2.

Рис. 3 Окуляр ГОИ ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и ФПМ

Fig. 3 Eyepiece SOI (State Optical Institute) of the optical correlation direction finder: design diagrams, field curvature, and MTF

Схема ОКП на основе окуляра ГОИ изображена на рис. 3, где видно, что в плоскости наилучшей установки качество изображения зрачка, определяемое по функции передачи модуляции (ФПМ), удовлетворительное, а величина контраста не хуже, чем в ОКП с высокими оптическими характеристиками.

Схема окуляра ГОИ с фокусным расстоянием 15 мм, спектральным диапазоном 0,48–0,90 мкм / Diagram of the SOI eyepiece with focal length 15 mm, spectral range 0.48–0.90 μm

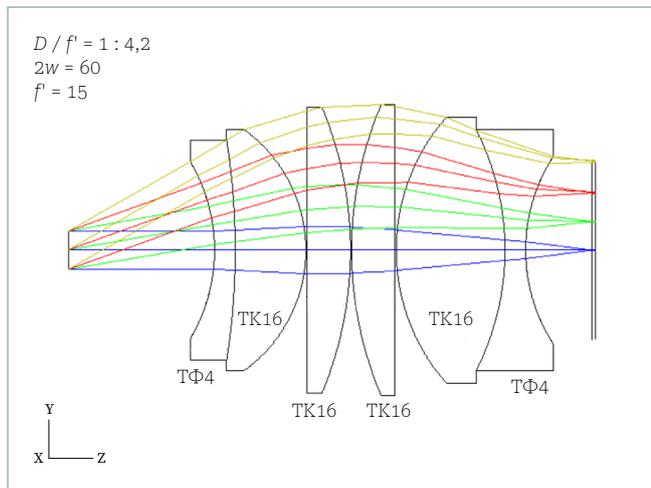


График кривизны поля, характеризующий качество изображения окуляра ГОИ / Field curvature graph characterizing the image quality of the SOI eyepiece

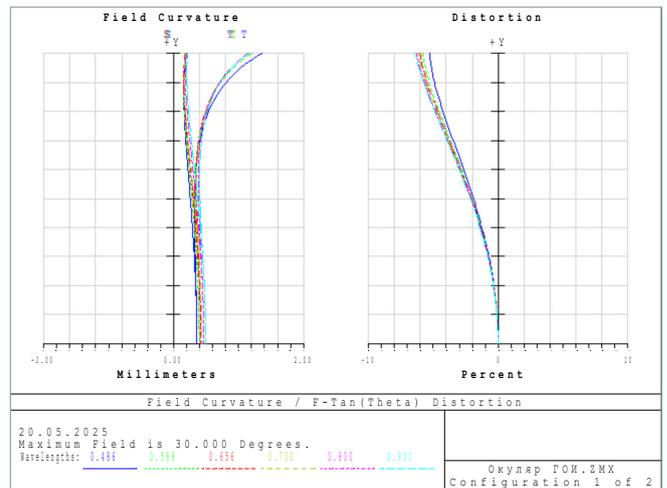


Схема ОКП на основе окуляра ГОИ / Diagram of the optical direction finder based on the SOI eyepiece

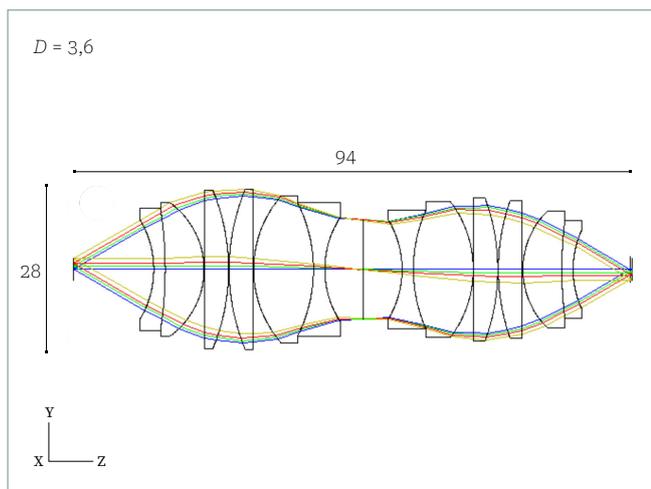
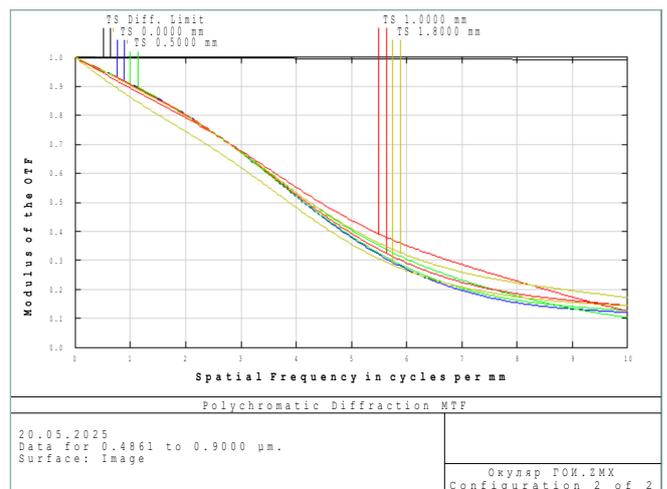


График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



3 Грамматин А.П., Романова Г.Э., Балаценко О.Н. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2011. 132 с.; Адьякова Н.С. Каталог окуляров в OPAL-PC. СПб., 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kmu.itmo.ru/file/download/application/36706> (дата обращения: 08.04.2025).

Схема ОКП на основе окуляра Эрфле изображена на рис. 4. Центральная линза данного окуляра, дающая оптическую силу, симметрична, а коррекционная нагрузка распределяется между крайними склеенными компонентами. Угловое поле немного меньше, чем в окуляре ГОИ, но коррекция aberrаций аналогична. Коррекции aberrаций при изображении зрачка в схемах ОКП из окуляров Эрфле и ГОИ практически идентичны. Объективы ОКП, построенные по схеме окуляров, допускают применение четырехсекторных фотоприемных устройств с зазором между площадками не менее 0,1 мм, как это следует из графика ФПМ.

Важно отметить, что при моделировании ОКП из окуляров оптимизация в САПР Zemax не проводилась ни для отдельного окуляра, ни для ОКП в целом. Таким образом, ОКП может быть построен из готовых компонентов, но при этом будут применяться склеенные поверхности, а размер зрачка будет ограничен до 3–4 мм. Это решение сужает область применения конструкции ОКП на основе окуляров. В частности, будет ограничена дальность работы корреляционного пеленгатора, что может быть неприемлемым для некоторых типов миссий.

Рис. 4  Окуляр Эрфле ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и ФПМ

Fig. 4 Erfle eyepiece of the optical direction finder: design diagrams, field curvature, and MTF

Схема окуляра Эрфле с фокусным расстоянием 15 мм, спектральным диапазоном 0,48–0,90 мкм / Diagram of the Erfle eyepiece with focal length 15 mm, spectral range 0.48–0.90 μm

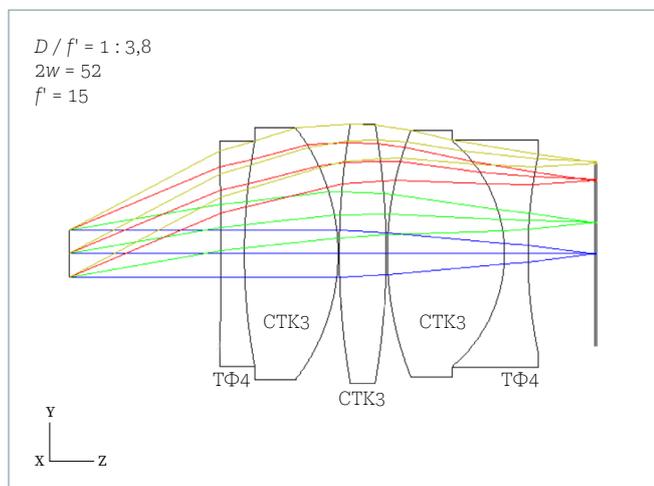


График кривизны поля, характеризующий качество изображения окуляра Эрфле / Field curvature graph characterizing the image quality of the Erfle eyepiece

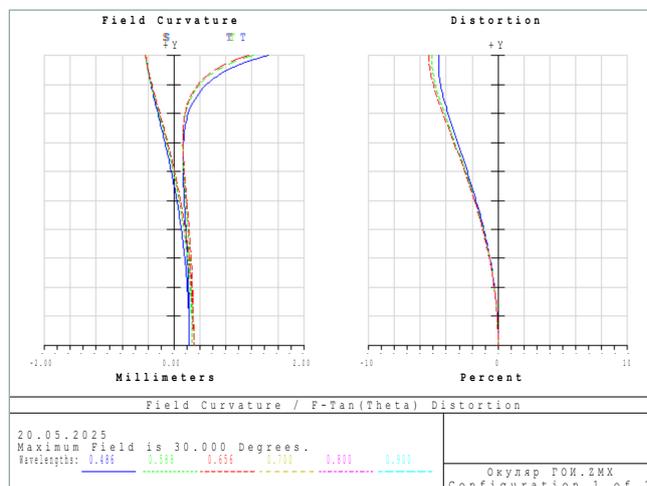


Схема ОКП на основе окуляра Эрфле / Diagram of the optical direction finder based on the Erfle eyepiece

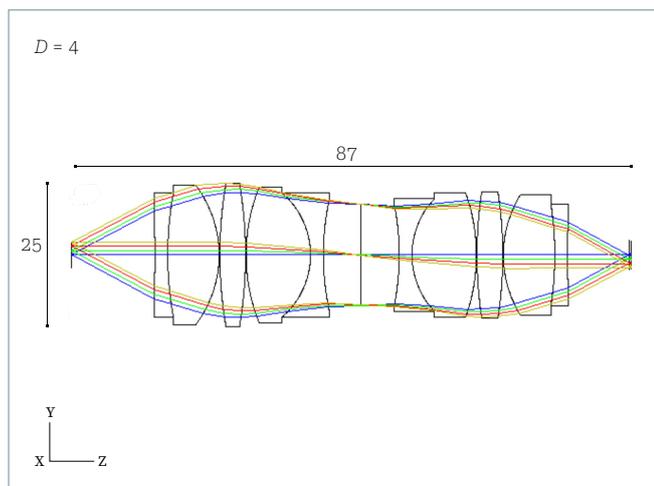
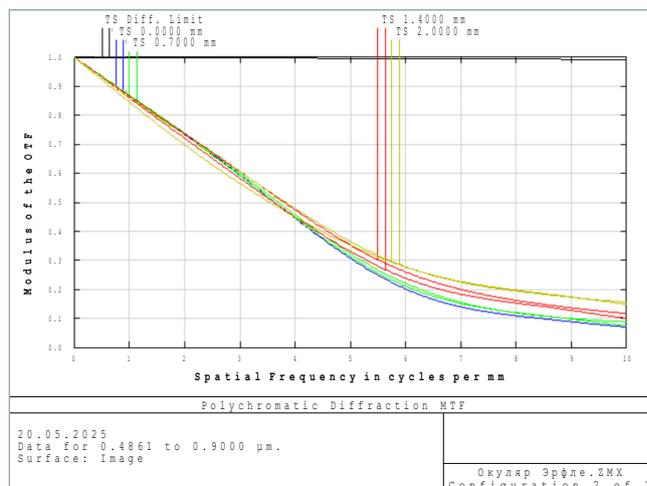


График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



2.3 ОКП на основе зеркала

Дальнейшее повышение оптических характеристик в линзовых симметричных схемах с вынесенным зрачком ограничено уровнем исправления хроматизма, необходимостью применения асферических поверхностей и кристаллических материалов с высоким показателем преломления.

Рассмотрим возможность повышения углового поля ОКП с применением анаберрационного зеркала в автоколлимационной схеме. В работе [15] указывалось, что трудность расчета корреляционного объектива по симметричной схеме заключается в необходимости одновременного исправления сферической aberrации и комы. Анаберрационная зеркальная поверхность строго свободна от сферической aberrации, а кома может быть уменьшена за счет низкого относительного отверстия. Расположим зрачок в фокусе параболического зеркала, обеспечивая этим телецентрический ход главного луча и симметрию хода апертурного луча. Центральное экранирование по полю регулируется фокусным расстоянием зеркала, которое должно быть значительно больше диаметра зрачка. Кома при отображении зрачка будет мала и в последующем будет скомпенсирована в автоколлимационной схеме (работа с увеличением $\beta = -1^x$). Кома при отображении предмета будет мала из-за малой ширины пучка относительно диаметра зеркала. Пятно рассеяния в широком поле будет определяться кривизной изображения, т. к. нет астигматизма и хроматических aberrаций. Используя классические подходы к расчетам оптических систем⁴ [20] и свойство параболы давать безаберрационное изображение⁵ точечного предмета из бесконечности, получим зависимость кривизны изображения Z'_p от угла поля ω :

$$Z'_p(\omega) = -2f' \left[1 + \frac{2}{\omega^2} (1 - \sqrt{\omega^2 + 1}) \right],$$

1

Рис. 5

Оптическая схема объектива ОКП на основе параболического зеркала

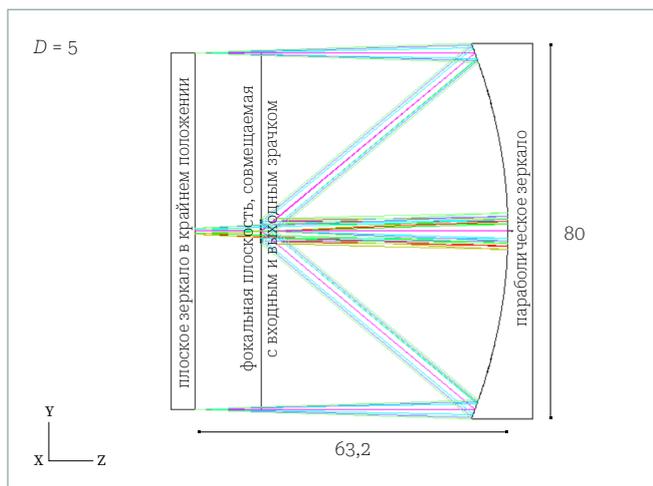
Fig. 5

Optical scheme of the optical direction finder objective based on parabolic mirror: ray tracing and modulation transfer function

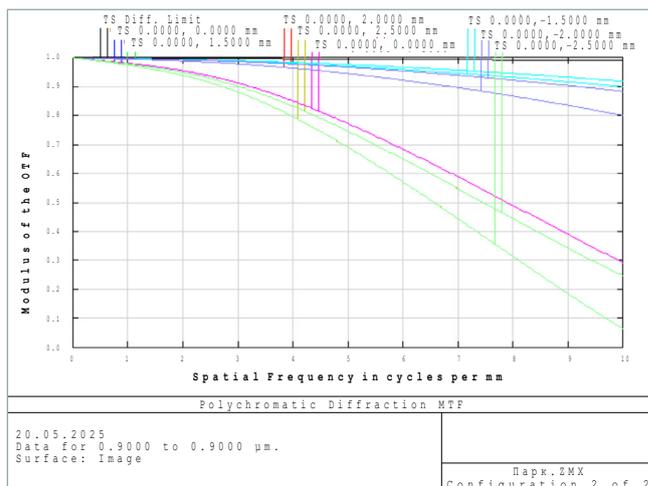
где f' — фокусное расстояние параболического зеркала.

Таким образом, в качестве УЦЭ можно предложить ряд эталонов в виде колец конечной площади, смещенных вдоль оптической оси в соответствии с (1). Расположим после УЦЭ плоское зеркало, отражающее пучок от объекта обратно на параболу. Таким образом получаем симметричную схему ОКП (оптическая схема объектива ОКП на основе параболического зеркала изображена на рис. 5, а ОКП в целом представлен на рис. 6).

Схема хода лучей (входной зрачок $D = 5$, угол поля $8^{\circ}32'$) / Ray tracing diagram (entrance pupil $D = 5$, field angle $8^{\circ}32'$)



ФПМ объектива / MTF of the objective across the field



- 4 Граматин А.П., Романова Г.Э., Балащенко О.Н. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2011. 132 с.
- 5 Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем: учебник: в 2 ч. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. 348 с.

Рис. 6 

Объектив ОКП на основе параболического зеркала: схемы конструкции, кривизна поля, смещение плоскости и пятно рассеяния

Fig. 6

Optical direction finder objective based on parabolic mirror: design diagrams, field curvature, defocus compensation, and spot diagram

Выходной зрачок сформируется строго с увеличением -1^x в плоскости входного зрачка и будет расположен симметрично относительно оптической оси, что позволяет разместить в этой плоскости фотоприемник⁶.

Особенностью зеркальной схемы ОКП является необходимость усложнения УЦЭ, увеличения его до размеров, сравнимых с размером параболического зеркала, а также обязательное применение отражающих систем на кремнии LCOS [21]. К преимуществам зеркальной схемы относятся возможность развития углового поля до 80° , отсутствие преломляющих поверхностей⁷, к недостаткам — большие поперечные габариты при малом диаметре зрачка, центральное экранирование по полю, сложность УЦЭ.

Схема объектива ОКП на основе параболического зеркала с фокусным расстоянием 50 мм / Diagram of the optical direction finder objective based on parabolic mirror with focal length 50 mm

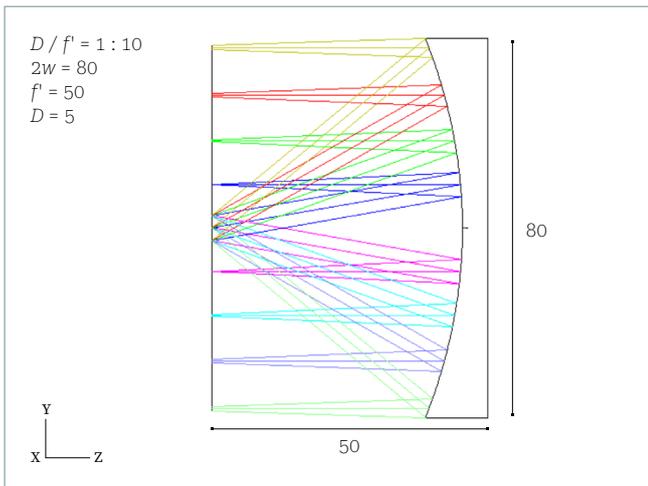


График кривизны поля, характеризующий качество изображения объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the objective

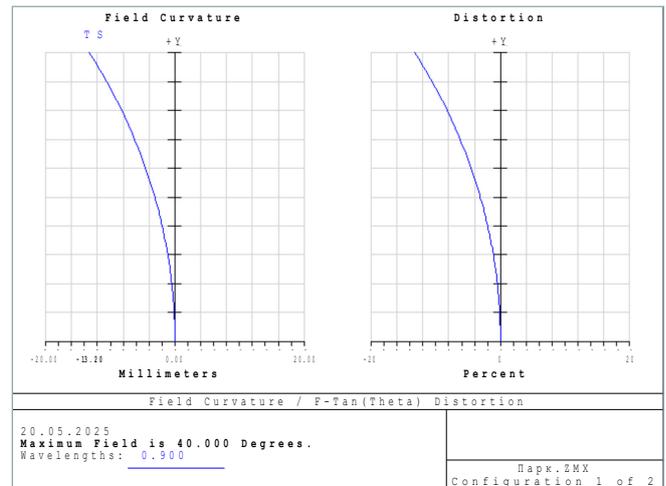


Иллюстрация необходимости смещения плоскости установки объектива для получения дифракционного качества изображения / Illustration of objective mounting plane shift requirement for diffraction-limited image quality

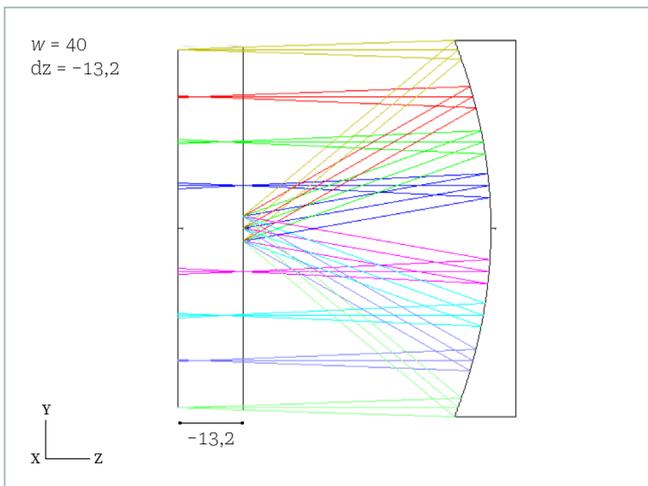
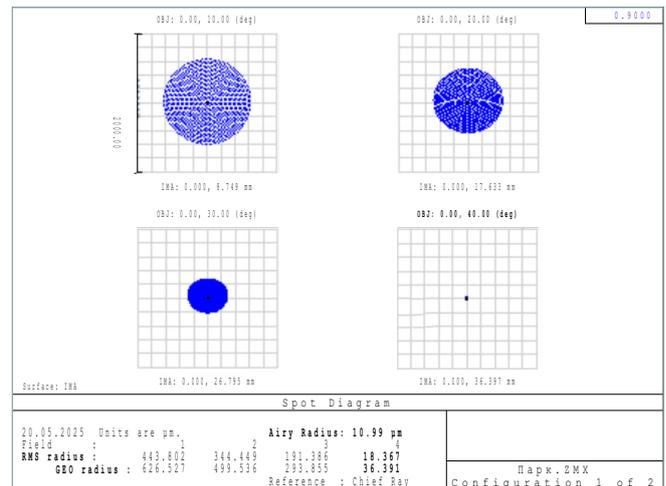


График пятна рассеяния ОКП при смещенной плоскости установки / Spot diagram of the optical direction finder with shifted mounting plane



- 6 Существенно то, что из-за свойств параболической поверхности сферическая абберация в изображении зрачка будет отсутствовать для любого поля.
- 7 В условиях дальнего космоса критически важна радиационная стойкость оптических материалов. Использование отражающей зеркальной поверхности принципиально исключает эту проблему.

3 Результаты и обсуждение

Рис. 7 

Прототип корреляционного объектива и ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и ФПМ

Fig. 7

Prototype of correlation objective lens and optical direction finder: design diagrams, field curvature, and MTF

В предыдущей работе [15] авторы предложили схемы, которые позволили достичь только средних и низких параметров. Поиск схем для реализации оптимального объектива продолжался, поскольку схема самого ОКП нетривиальна и создание объектива представляется самостоятельной научно-технической задачей прикладного характера.

Уместно сравнить полученные схемы ОКП с первоначальной схемой прототипа ОКП, представленной на рис. 7.

Схема прототипа корреляционного объектива с фокусным расстоянием 25 мм, спектральным диапазоном 0,8–1,0 мкм / Diagram of the correlation objective lens prototype with focal length 25 mm, spectral range 0.8–1.0 μm

График кривизны поля, характеризующий качество изображения прототипа корреляционного объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the correlation objective lens prototype

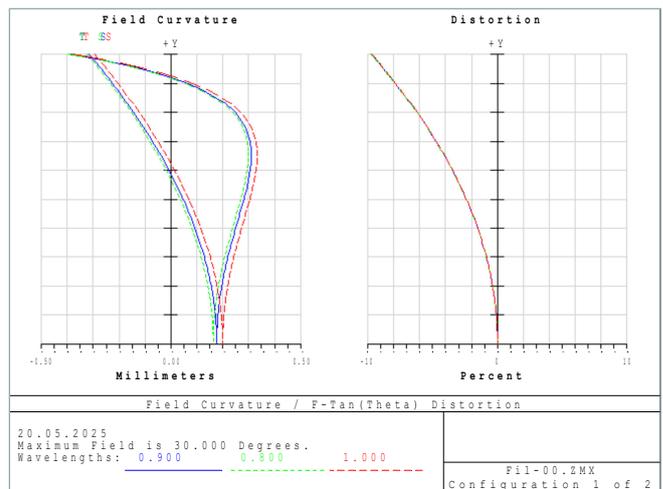
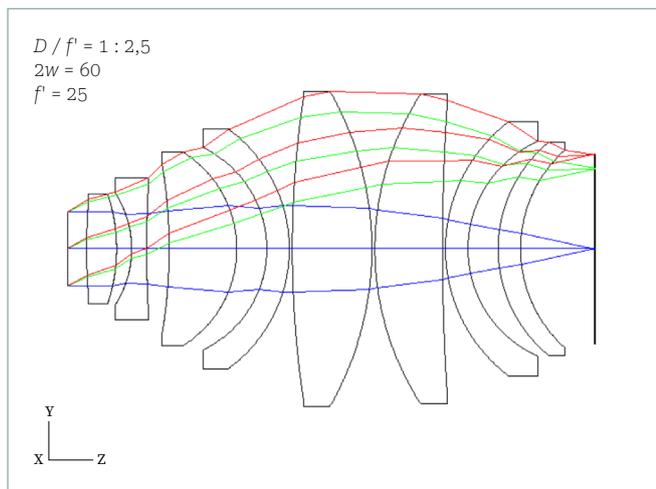
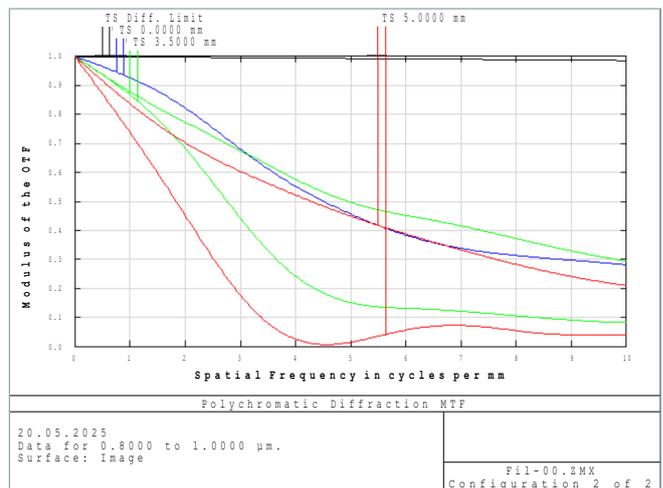
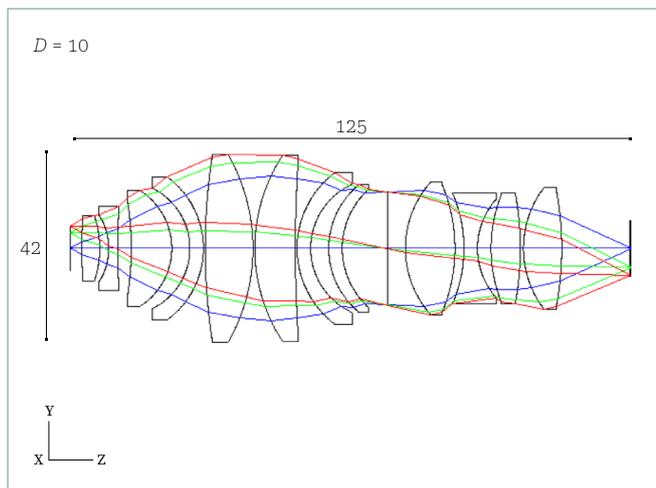


Схема прототипа ОКП / Diagram of the optical direction finder prototype

График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



В оптической схеме отсутствуют асферические поверхности, выполнена коррекция aberrаций для точки на оси и хорошо исправлены aberrации в зрачке. Оптические характеристики всех приведенных вариантов схем ОКП сведены в табл. 2.

Предложенные в данной работе схемы позволяют либо обеспечить высокие оптические характеристики, как, например, корреляционный объектив (табл. 2, строка 1). При этом схема является ресурсоемкой. Предложены также схемы (табл. 2), которые в значительной степени менее требовательны к ресурсам в процессе изготовления, но каждая из них в какой-то степени уступает первой.

Использование данных схем целесообразно в зависимости от задач, которые ставятся перед космическим аппаратом и миссией в целом. Возможно, что несколько меньшие параметры будут вполне достаточны для конкретной миссии и в совокупности с сокращением затрат получат большее распространение.

Таблица 2 

Оптические характеристики предложенных схем ОКП

Table 2

Optical characteristics of the proposed optical direction finder schemes

	Тип схемы	Характеристики				
		$2\omega, ^\circ$	$D, \text{мм}$	$f', \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$N, \text{мм}^{-1}$
1	Прототип	60	10	25	125	10
2	Корреляционный объектив	50	14	15	93	10
3	Окуляр ГОИ	60	3,6	15	94	7
4	Окуляр Эрфле	52	4	15	87	7
5	Зеркальная система	80	5	50	63,2	>10

Данная статья и все исследование в целом направлены на то, чтобы доказать, что создание объектива ОКП с высокими характеристиками в принципе возможно. Предложенные схемы с компромиссными оптическими параметрами — решение другой задачи: показать, что можно не только создать объектив, но и выбрать оптимальную схему, исходя из задач и ограничений (в том числе финансовых) конкретной миссии.

Заметим, что ОКП, построенные по симметричной схеме, имеют во всех случаях меньшую, чем в прототипе, длину L . ОКП на основе схемы окуляров отличается от прототипа сниженным более чем в два раза диаметром входного зрачка и уменьшенным фокусным расстоянием, но при этом они более технологичны и просты в изготовлении, что непременно позволит снизить себестоимость.

ОКП на основе зеркала отличается от прототипа увеличенным полем зрения, уменьшенной в два раза длиной самого объектива, лучшим качеством изображения зрачка. Однако следствием этих улучшений стало увеличение поперечных габаритов, экранирование поля зрения и усложнение УЦЭ. Корреляционный объектив имеет сравнимые с прототипом характеристики, но уменьшенное с 12 до 8 число линз за счет применения асферической поверхности.

Зеркальная схема ОКП интересна еще и тем, что ее масштабирование позволяет увеличить диаметр входного зрачка до любых величин без ухудшения абберационной коррекции как для предмета, так и для зрачка. Это возможно именно благодаря использованию зеркального объектива, который не вносит хроматических aberrаций. Практическая целесообразность в таком случае определяется только типом решаемых задач, а также ограничениями УЦЭ и фотоприемника. Другими словами, теоретически возможно создание ОКП без компромисса между угловым полем и размером входного зрачка.

4 Выводы

В статье предложены схемы, которые позволяют создавать для некогерентного корреляционного пеленгатора объективы с высокими и компромиссными оптическими характеристиками. Представлены оптические характеристики всех приведенных вариантов схем ОКП (табл. 2).

Были исследованы схемы ОКП с высокими оптическими характеристиками, получен корреляционный объектив ОКП, позволяющий создать ОКП, сравнимый по характеристикам с прототипом, предложены альтернативные схемы ОКП на основе известных окуляров, зеркальная схема ОКП, имеющая преимущество в угловом поле и в качестве изображения зрачка. Вопрос о возможности достижения сверхвысоких оптических характеристик ОКП, определяемых корреляционным объективом (табл. 1, строка 1), остается предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Cocaud C., Kubota T. Autonomous navigation near asteroid based on visual SLAM // Proceedings of the 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics. Pasadena, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.issfd.org/ISSFD_2012/ISSFD23_AD_5.pdf (дата обращения: 09.04.2025).
2. Cocaud C., Kubota T. SLAM-based navigation scheme for pinpoint landing on small celestial body // *Advanced Robotics*. 2012. Vol. 26. Iss. 15. P. 1747–1770. DOI:10.1080/01691864.2012.685227.
3. Jaumann R., Schmitz N., Koncz A., et al. The camera of the MASCOT asteroid lander on board Hayabusa 2 // *Space Science Reviews*. 2017. Vol. 208. P. 375–400. DOI:10.1007/s11214-016-0263-2.
4. Viola P.A., Jones M.J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai: IEEE, 2001. Vol. 1. P. 511–518. DOI:10.1109/CVPR.2001.990517.
5. Bellerose J., Vaughan A.T., Bhaskaran S., et al. Double asteroid redirection test (DART): navigating to obliteration // *Acta Astronautica*. 2024. Vol. 219. P. 417–432. DOI:10.1016/j.actaastro.2024.02.021.
6. Жуков Б.С., Жуков С.Б. Алгоритм автономного выбора места посадки КА «Фобос Грунт» по телевизионным изображениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8, № 2. С. 281–288.
7. Балдина Е.А., Бессонов Р.В., Гришин В.А. и др. Оценка возможности использования карты береговых линий GSHHG для автономной оптической навигации космических аппаратов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 3. С. 217–228. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-217-228.
8. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Форш А.А. Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 2. С. 61–76.
9. 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.
10. 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.
11. Буслаев С.П. Техническое зрение искусственного интеллекта в будущих задачах посадок и перемещений космических аппаратов // *Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность: материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 15–17 сентября 2020 г. Ч. 2. Калуга: ИП Стрельцов И.А., 2020. С. 86–89.*
12. Косова А.Е., Корииков А.М. Автоматическая посадка малых беспилотных летательных аппаратов с использованием компьютерного зрения // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2017. Т. 20, № 3. С. 191–196.
13. Лобанов А.А., Можаров Г.А., Филонов А.С. Оптический пеленгатор для автономной посадки космического зонда на малые тела Солнечной системы // *Фотоника*. 2022. Т. 16, № 5. С. 404–415. DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.5.404.414.
14. Кузнецов-Фетисов И.Н., Якубовский С.В. Разработка инструментария для анализа оптических систем в области аббераций третьего порядка в программе Zemax // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2022. Т. 66, № 4. С. 101–115. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-4-101-115.
15. Боголюбов И.А., Лобанов А.А. Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с низкими и средними оптическими характеристиками // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2024. Т. 68, № 5. С. 143–154. DOI:10.30533/GiA-2024-045.
16. Поляков М.П., Хохлов Д.Д., Быков А.А. Апохроматический объектив для изображающих спектральных систем видимого, ближнего

- и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 585–590. DOI:10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590.
17. Табачков А.Г., Латыев С.М., Фролов Д.Н. Унификация конструкций линзовых микрообъективов // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 1. С. 38–44.
 18. Семенов А.В., Табачков А.Г., Мухина Е.Н. и др. Модернизация конструкции микрообъектива для возможности работы с разными покровными стеклами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 4. С. 23–28. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://applied-research.ru/article/view?id=12177> (дата обращения: 23.04.2025).
 19. Арасланов Д.Ю., Табачков А.Г. Разработка и исследование конструкции широкопольных микрообъективов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19278> (дата обращения: 23.04.2025).
 20. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Модульное проектирование оптических систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 3. С. 57–62.
 21. Zhang Z., You Z., Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices // Light: Science and Applications. 2014. Vol. 3, No. 10. P. e213. DOI:10.1038/lsa.2014.94.

АВТОРЫ Боголюбов Игорь Александрович✉ bogol007@mail.ru

АО «Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”», Москва, Россия

🆔 0009-0005-8219-1713

Лобанов Александр АнатольевичФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия
кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий

канд. техн. наук, доцент

🆔 0000-0003-2690-5660

Можаров Григорий Афанасьевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», Москва, Россия

кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

д-р техн. наук, профессор

Поступила 10.06.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Calculation of a Lens for an Incoherent Optical Correlation Direction Finder with High and Compromise Optical Performance

Igor A. Bogolyubov¹, Aleksandr A. Lobanov²✉, Grigorij A. Mozharov³

¹ Joint-stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instrument”, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

✉ aa.lobanoff@ya.ru

CITATION Bogolyubov IA, Lobanov AA, Mozharov GA. Calculation of a Lens for an Incoherent Optical Correlation Direction Finder with High and Compromise Optical Performance. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 99–114. DOI:10.30533/GiA-2025-048.

KEYWORDS incoherent optics, correlation direction finder, lens calculation, optical system optimization, practical implementation image quality, machine vision system

ABSTRACT The article proposes an optical layout and presents a detailed parameter calculation of a high-performance objective lens designed for a four-channel incoherent optical correlation direction finder. A feasible solution is developed using currently available materials and manufacturing technologies. However, achieving high optical performance required the inclusion of a significant number of resource-intensive components. Taking this into account, the study further explores the possibility of achieving a compromise improvement in optical characteristics by employing widely used and economically justified optical materials and elements. Two alternative optical configurations for the direction finder objective are proposed and substantiated as part of the compromise design. The first is based on the well-known SOI (State Optical Institute) eyepiece, and the second utilizes a single parabolic mirror. The optical parameters of both configurations are calculated, and their application limitations are discussed. The results obtained enable the development of both a high-performance objective for an incoherent correlation direction finder and a practical compromise variant suitable for experimental correlation signal analysis.

REFERENCES

1. Cocard C, Kubota T. Autonomous navigation near asteroid based on visual SLAM. *Proceedings of the 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics*. Pasadena, 2012. Available from: https://www.issfd.org/ISSFD_2012/ISSFD23_AD_5.pdf (Accessed 9 April 2025).
2. Cocard C, Kubota T. SLAM-based navigation scheme for pinpoint landing on small celestial body. *Advanced Robotics*. 2012;26(15): 1747–1770. DOI:10.1080/01691864.2012.685227.
3. Jaumann R, Schmitz N, Koncz A, et al. The camera of the MASCOT asteroid lander on board Hayabusa 2. *Space Science Reviews*. 2017;208: 375–400. DOI:10.1007/s11214-016-0263-2.
4. Viola PA, Jones MJ. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Kauai: IEEE; 2001;1: 511–518. DOI:10.1109/CVPR.2001.990517.
5. Bellerose J, Vaughan AT, Bhaskaran S, et al. Double Asteroid Redirection Test (DART): Navigating to Obliteration. *Acta Astronautica*. 2024;219: 417–432. DOI:10.1016/J.ACTAASTRO.2024.02.021.
6. Zhukov BS, Zhukov SB. Algoritm avtonomnogo vybora mesta posadki KA “Fobos Grunt” po televizionnym izobrazhenijam [Algorithm for autonomous landing site selection of the Phobos-Grunt spacecraft]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*. 2011;8(2): 281–288. (In Russian).
7. Baldina EA, Bessonov RV, Grishin VA, et al. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya karty beregovykh linij GSHHG dlja avtonomnoj opticheskoj navigacii kosmicheskikh apparatov [Assessment of GSHHG shoreline map applicability for autonomous optical navigation of spacecraft]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2016;13(3): 217–228. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-217-228.
8. Zhukov BS, Zhukov SB, Forsh AA. Vozmozhnosti navigacionnykh izmerenij po limbu Zemli v vidimom i blizhnem IK diapazone [Potential of navigational measurements using Earth's limb in visible and near-IR range]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015;12(2): 61–76. (In Russian).
9. Avanesov GA, Zhukov BS, Smetanin PS. Stend dlja otrabotki tehnologii avtonomnoj priplanetnoj navigacii [Test bench for autonomous planetary approach navigation technologies]. *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.
10. Zhukov BS, Polyanskiy IV, Zhukov SB. Avtonomnaja opticheskaja navigacija na okololunnykh orbitah i pri posadke na Lunu s pomow'ju sverhshirokougol'noj kamery [Autonomous optical navigation in cislunar orbits and lunar landing using ultra-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.
11. Buslaev SP. Tehnicheskoe zrenie iskusstvennogo intellekta v buduwih zadachah posadok i peremewenij kosmicheskikh apparatov [Computer vision and artificial intelligence for future spacecraft landing and mobility tasks]. *Proceedings of the 55th Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 15–17, 2020*. Part 2. Kaluga: IP Strel'cov I.A.; 2020: 86–89. (In Russian).
12. Kosova AE, Korikov AM. Avtomaticheskaja posadka malyh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem komp'yuternogo zrenija [Automatic landing of small UAVs using computer vision]. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2017;20(3): 191–196. (In Russian).
13. Lobanov AA, Mozharov GA, Filonov AS. Opticheskij pelengator dlja avtonomnoj posadki kosmicheskogo zonda na malye tela Solnechnoj sistemy [Optical direction finder for autonomous spacecraft landing on small Solar System bodies]. *Photonics*. 2022;16(5): 404–415. (In Russian). DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.5.404.414.
14. Kuznetsov-Fetisov IN, Yakubovsky SV. Razrabotka instrumentarija dlja analiza opticheskikh sistem v oblasti aberracij tret'ego porjadka v programme Zemax [Development of tools for third-order aberration analysis in Zemax]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(4): 101–115. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-4-101-115.
15. Bogolyubov IA, Lobanov AA. Raschet obektiva nekogerentnogo opticheskogo korrelyacionnogo pelengatora s nizkimi i srednimi opticheskimi harakteristikami [Lens design for an incoherent optical correlation direction finder with low to medium optical characteristics]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(5): 143–154. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-045.

16. Poljakov MP, Hohlov DD, Bykov AA. Apohromaticheskij ob'ektiv dlja izobrazhajuwih spektral'nyh sistem vidimogo, blizhnego i korotkovolnovogo infrakrasnogo diapazonov spectra [Achromatic objective for imaging spectral systems of visible, near and short-wave infrared spectrum ranges]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025;25(4): 585–590. (In Russian). DOI:10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590.
17. Tabachkov AG, Latyev SM, Frolov DN. Unifikatsiya konstruksiy linzovykh mikroob'ektiv [Unification of lens micro-objective designs]. *Opticheskij Zhurnal*. 2011;78(1): 38–44. (In Russian).
18. Semenov AV, Tabachkov AG, Mukhina EN, et al. Modernizatsiya konstruksii mikroob'ektiva dlja vozmozhnosti raboty s raznymi pokrovnymi steklami [Modernization of the micro-objective design for the possibility of working with different cover glasses]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;4: 23–28. (In Russian). Available from: <https://applied-research.ru/article/view?id=12177> (Accessed 23 April 2025).
19. Araslanov DY, Tabachkov AG. Razrabotka i issledovanie konstruksii shirokopol'nykh mikroob'ektiv [Development and research of wide-field micro-objective designs]. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;1-1. (In Russian). Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19278> (Accessed 23 April 2025).
20. Andreev LN, Ezhova VV, Degtyareva GS. Modul'noe proektirovanie opticheskikh sistem [Modular design of optical systems]. *Instrument Engineering Higher Education Institutions Reports*. 2014;57(3): 57–62. (In Russian).
21. Zhang Z, You Z, Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices. *Light: Science and Applications*. 2014;3(10): e213. DOI:10.1038/lssa.2014.94.

AUTHORS Igor A. Bogolyubov

✉ bogol007@mail.ru

Joint-stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instrument”, Moscow, Russia

ID 0009-0005-8219-1713

Aleksandr A. Lobanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies
PhD in Engineering, Associate Professor

ID 0000-0003-2690-5660

Grigorij A. Mozharov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

Submitted: June 10, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Идентификация земельных ресурсов Краснодарского края в целях изучения динамики перераспределения земельного фонда

Д.А. Гура^{1,2}✉, М.В. Кузякина^{1,3}, Т.А. Тихонов¹, А.В. Карагян^{1,3}

¹ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

² Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

³ Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

✉ gda-kuban@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Гура Д.А., Кузякина М.В., Тихонов Т.А., Карагян А.В. Идентификация земельных ресурсов Краснодарского края в целях изучения динамики перераспределения земельного фонда // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 115–124. DOI:10.30533/GiA-2025-053.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА земельные ресурсы, геопортал, дешифрирование, классификация земной поверхности, землеустройство

АННОТАЦИЯ В работе представлена методика идентификации земельных ресурсов (определения типов землепользования) по данным глобальных географических порталов. Выполнено сравнение результатов идентификации земельных ресурсов по данным мировых географических порталов, выбраны тестовый полигон и спутниковые снимки для построения карт земельного фонда, а также применены различные инструменты дешифрирования во временном и пространственном масштабах. В результате сравнительного анализа для получения данных было выбрано два географических портала — Copernicus Land Monitoring Service и ESA World Cover. Функцию тестового полигона для идентификации выполнял Краснодарский край, который представлен на всех исследуемых глобальных географических порталах. Цель работы состояла в получении по данным дистанционного зондирования, отраженным на современных глобальных геопорталах, достоверных сведений о категориях земельного фонда. В процессе дешифрирования материалов были выявлены значительные расхождения в показателях, полученных с разных геопорталов. В результате дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли и идентификации земельных ресурсов в динамике с 2015 по 2019 год были составлены картосхемы выбранной территории и определены как преобладающие, так и менее распространенные типы растительности, а также дешифрированы застроенные земли на исследуемых территориях.

1 Введение

Рациональное использование земельных ресурсов является главным условием устойчивого развития территории, поскольку земля — ограниченный и невозпроизводимый ресурс, от состояния которого зависит функционирование всех отраслей, включая промышленность, транспорт и жилищное строительство. В связи с этим эффективное управление земельным фондом требует не только правовых и организационных механизмов, но и современных технологических подходов к учету, мониторингу и прогнозированию изменений.

На сегодняшний день пространственное развитие территории имеет важнейшее значение, что обуславливает актуальность изучения земельных ресурсов. Стоит отметить, что земельные ресурсы лежат в основе как развития многих секторов экономики, так и расположения производственных и непроизводственных объектов [1–5].

В табл. 1 представлена структура земельного фонда в Краснодарском крае в 2015, 2017, 2019 годах по данным государственных (национальных) докладов о состоянии и использовании земель в Российской Федерации¹. Общая площадь края составляет 7548,5 тыс. га, большую ее часть занимают земли сельскохозяйственного назначения. В связи с полученными данными целесообразно выявить возможность определения назначения земель по данным глобальных геопорталов.

Таблица 1 ↘

Структура земельного фонда по категориям в Краснодарском крае в 2015, 2017, 2019 гг., тыс. га

Table 1

The structure of the land fund by category in the Krasnodar Territory in 2015, 2017, 2019, thousand hectares

Тип землепользования	2015 год	2017 год	2019 год
Земли сельскохозяйственного назначения	4727,9	4715,0	4695,3
Земли населенных пунктов	615,2	627,5	649,7
Земли промышленности	147,2	148,7	147,2
Земли особо охраняемых природных территорий	379,1	378,8	378,7
Земли лесного фонда	1211,3	1211,2	1210,9
Земли водного фонда	324,6	324,6	325,1
Земли запаса	143,2	142,7	141,6

Таким образом, можно определить проблему как отсутствие формализованной методики идентификации земельных ресурсов, которая бы опиралась на данные глобальных географических порталов, позволяла бы достоверно определять типы землепользования и изучать динамику перераспределения земельного фонда в ретроспективе. Текущая ситуация приводит к неэффективному управлению земельными ресурсами, деградации земель и несбалансированному территориальному развитию. Как показывают научные работы в этом направлении, использование геопорталов и геоинформационных технологий (геоинформационных систем) может значительно улучшить ситуацию [6–11]. Например, геопорталы обеспечивают доступ к актуальным пространственным данным, позволяя визуализировать и анализировать изменения земельного фонда в режиме реального времени [12–13]. Однако, несмотря на потенциал региональных и муниципальных геопорталов в России, в них отсутствуют стандарты, регулярные обновления данных, единые методики анализа и данные о территории [14].

В ряде стран, включая Россию, пока нет единого подхода к организации, обновлению и использованию пространственных данных. Существующие

¹ Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации (по годам) // Росреестр: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 01.03.2024).

Рис. 1 ▼

Алгоритм идентификации земельных ресурсов по данным геопорталов

Fig. 1

Algorithm for determining land resources using geoportals data

**Рис. 2** ▶

Положение тестового полигона

Fig. 2

Position of the test site

ресурсы фрагментарны, не всегда совместимы между собой, а доступ к данным зачастую ограничен. В связи с этим предлагается использовать глобальные геопорталы для распознавания типов землепользования [15].

Цель исследования — предложить методику идентификации земельных ресурсов на основе современных геоинформационных технологий, опирающуюся на данные глобальных географических порталов, которая позволит достоверно идентифицировать категории земельного фонда и изучать динамику его перераспределения. Под идентификацией земельных ресурсов при этом понимается определение типов землепользования.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

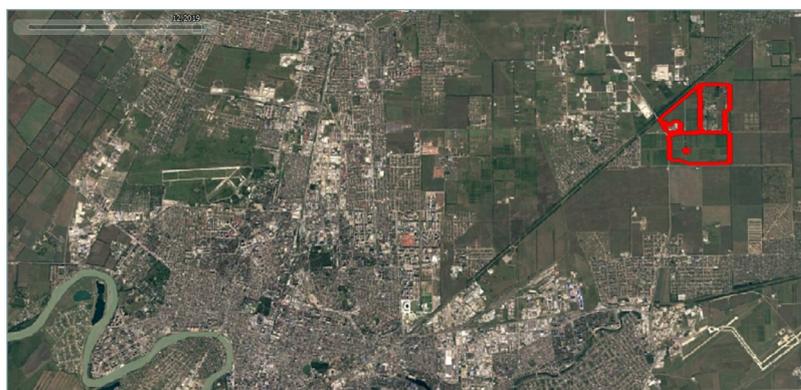
- проанализировать глобальные геопорталы Copernicus Land Monitoring Service (CLMS)² и ESA World Cover³;
- разработать алгоритм интеграции разнородных геопространственных данных для комплексного анализа динамики земельного фонда;
- на примере конкретной территории применить разработанную методику и оценить ее эффективность.

2 Материалы и методы

Методика идентификации земельных ресурсов по данным географических порталов представляет собой алгоритм, поддающийся формализации (рис. 1).

На начальном этапе необходимо определить цель идентификации типов землепользования (сравнение данных нескольких геопорталов или проведение ретроспективного анализа). После выбора исследуемых земельных участков (участка) в зависимости от поставленной цели производится выбор слоев конкретных геопорталов, т. е. сбор данных. За дешифрированием и созданием картосхем следуют классификация и выделение нужных типов землепользования для дальнейшей верификации. Под верификацией в общем смысле может подразумеваться сравнение с результатами как геопортала другого типа (в том числе с кадастровой картой), так и полевых измерений. На заключительном этапе формируется документ с интерпретацией результатов согласно блок-схеме (рис. 1).

Для повышения полноты исследования был выбран тестовый полигон, состоящий из двух кадастровых участков (23:43:0417022:594 и 23:43:0417022:579) общей площадью около 9,1 км². Оба являются участками сельскохозяйственного назначения. Положение тестового полигона определяется на северо-востоке в границах муниципального образования город Краснодар (рис. 2).



2 Copernicus Land Monitoring Service // Copernicus: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://land.copernicus.eu> (дата обращения: 21.02.2024).

3 ESA World Cover // European Space Agency: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://viewer.esa-worldcover.org> (дата обращения: 21.02.2024).

Геопорталы CLMS и ESA World Cover были выбраны для исследования по причине обширных классификаций поверхности, а также широкого охвата всей планеты Земля. Пространственное разрешение составляет 100 и 300 м соответственно. На рис. 3 представлено разделение земной поверхности по данным геопортала CLMS на 10 классов: лес, кустарники, травянистая растительность, водно-болотные угодья, мхи и лишайники, редкая растительность, пахотные земли, строения, снег или лед, водоемы. Классификация земной поверхности на геопортале ESA World Cover более разветвленная и содержит 36 классов (рис. 4). Очевидно, что привести во взаимно однозначное соответствие типы земельного фонда, представленные ниже в табл. 2, и классы земной поверхности на рис. 3, 4 не представляется возможным. Однако можно выделить соответствие некоторых типов и классов. Лучше всего поддаются распознаванию пахотные земли, застроенные территории, поверхность водных объектов, лес и водно-болотные угодья.

По данным геопорталов CLMS и ESA World Cover было выполнено дешифрирование типов земель тестового полигона, представленного на рис. 2. В результате географической привязки категории в исследуемых геопорталах (табл. 2) были приведены к единому обозначению. По данным геопортала ESA World Cover распознаны 3 категории (лес, застроенные территории, пахотные земли), по данным геопортала CLMS — 6 категорий (лес, застроенные территории, пахотные земли, редкая растительность, травянистая растительность, болото).

Таблица 2 
Вычисленные площади типов земельного фонда, м²

Table 2
Calculated areas of land fund types, m²

Категория	ESA World Cover			CLMS		
	2015 г.	2017 г.	2019 г.	2015 г.	2017 г.	2019 г.
Лес	2 119 227	2 119 227	2 119 227	5 652 409	5 652 409	6 054 199
Застроенные территории	558 903	558 903	558 903	1 311 018	1 311 018	1 207 743
Пахотные земли	6 564 001	6 564 001	6 564 001	1 357 038	1 357 038	1 347 109
Редкая растительность	-	-	-	-	-	126 078
Травянистая растительность	-	-	-	680 827	680 827	305 707
Болото	-	-	-	52 597	52 597	-

Рис. 3 
Классификация земной поверхности по данным геопортала CLMS

Fig. 3
Land cover classification according to data from the CLMS

- Условные обозначения**
-  Лес
 -  Кустарники
 -  Травянистая растительность
 -  Водно-болотные угодья
 -  Мхи и лишайники
 -  Редкая растительность
 -  Пахотные земли
 -  Строения
 -  Снег, лед
 -  Водоемы

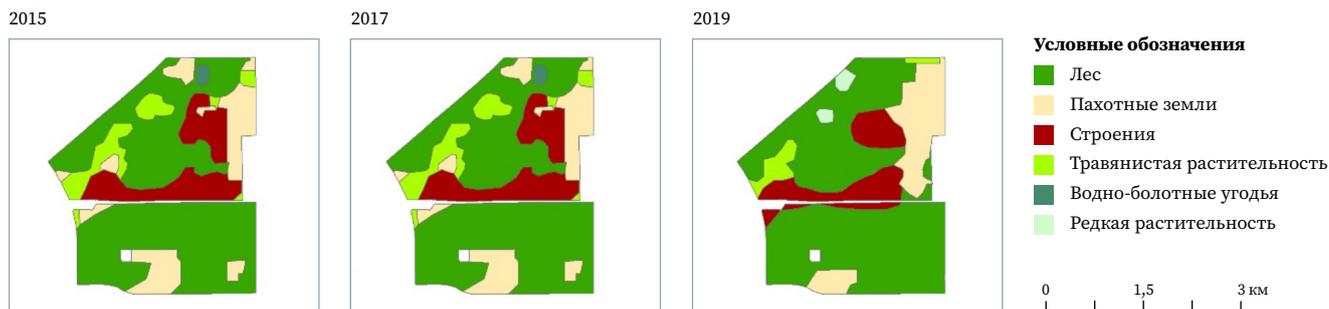
Рис. 4 
Классификация земной поверхности по данным геопортала ESA World Cover

Fig. 4
Land cover classification according to the ESA World Cover geoportал

Условные обозначения

-  Нет данных
-  Пахотные земли
-  Травянистая растительность
-  Кустарники
-  Орошаемые земли
-  Мозаичная пахотная растительность
-  Мозаичная естественная растительность
-  Древесный покров широколиственный вечнозеленый
-  Лесной покров широколиственный листопадный
-  Лесной покров широколиственный листопадный сомкнутый
-  Лесной покров широколиственный листопадный открытый
-  Древесный покров хвойный вечнозеленый
-  Древесный покров хвойный вечнозеленый сомкнутый
-  Древесный покров хвойный вечнозеленый открытый
-  Древесный покров хвойный листопадный открыто-закрытый
-  Древесный покров хвойный листопадный сомкнутый
-  Древесный покров хвойный листопадный открытый
-  Древесный покров со смешанной листвой
-  Мозаичный древесно-кустарниковый покров
-  Мозаичный травянистый покров
-  Кустарниковая местность
-  Вечнозеленый кустарник
-  Листопадный кустарник
-  Пастбища
-  Лишайники и мхи
-  Редкая растительность
- Редкий кустарник
- Разреженный травянистый покров
- Лесной покров, затопленный пресной или солоноватой водой
- Лесной покров, затопленный соленой водой
- Кустарниковый или травянистый покров, затопленный пресной / солоноватой / соленой водой
- Строения
- Оголенные области
- Объединенные оголенные области
- Неконсолидированные голые участки
- Водоемы
- Снег, лед

Copernicus Land Monitoring Service



ESA World Cover

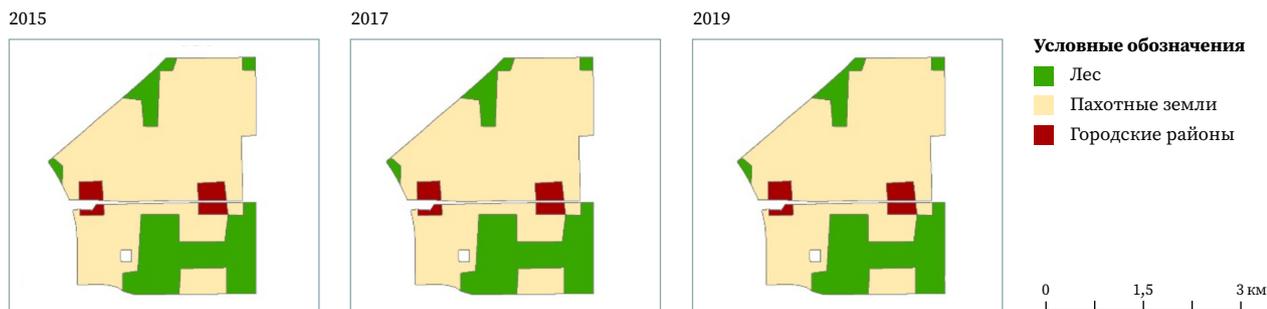


Рис. 5 Картограмма тестового полигона по данным геопорталов

Fig. 5 Map of the test site according to geoportals

В результате были составлены картограммы тестового полигона на основе данных геопорталов CLMS и ESA World Cover, отражающие распознанные категории (рис. 5). На картах представлено расположение категорий, которые были использованы в целях распознавания земельных ресурсов Краснодарского края за период с 2015 по 2019 год и проведения ретроспективного анализа. В условных обозначениях отмечены исходные категории, применяемые на официальных сайтах соответствующих геопорталов.

3 Результаты и обсуждение

После выполнения картограмм кадастровых участков 23:43:0417022:594 и 23:43:0417022:579 необходимо определить типы землепользования и застроенные территории. В результате анализа было установлено, что на исследуемом участке площадь застроенных земель по данным геопортала ESA World Cover составила около 0,5 км², а по данным CLMS — около 0,1 км². Можно сделать вывод, что для распознавания застройки эти геопорталы непригодны из-за неподходящего пространственного разрешения. Площадь пашни по данным ESA World Cover составила 6,5 км², а по данным CLMS — всего около 0,1 км².

Таким образом, для целей первичного распознавания типов землепользования можно использовать ESA World Cover. CLMS для распознавания типов землепользования не подходит.

Для оценки эффективности предложенной методики были использованы ретроспективные спутниковые снимки. В результате сравнения космоснимков с расчетами по данным геопорталов было выявлено точное расположение застроенных территорий на выбранных участках. Сопоставление данных показало, что для распознавания застройки можно использовать CLMS, но нельзя применять ESA World Cover. В то же время после сопоставления для распознавания типов землепользования, имеющего большие обобщения, можно задействовать ESA World Cover, тогда как CLMS дает противоречивые результаты, разбивая земли на слишком большое количество классов.

4 Выводы

Сравнение двух геопорталов выявило различия в классификациях землепользования. Это подчеркивает необходимость выбора подходящего ресурса в зависимости от задач исследования, а также влияние пространственного разрешения снимков на детализацию результатов дешифрирования.

Представленная методика способствует цифровизации процессов мониторинга земель, что соответствует приоритетам государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» и национальных целей устойчивого развития в области управления природными ресурсами. Предложенная технология анализа на базе геоинформационной системы и геопортальных данных может быть адаптирована для других субъектов РФ, особенно с выраженной динамикой застройки и аграрного развития, что делает методику универсальной и ценной с практической точки зрения. Дальнейшее развитие предложенной методики возможно за счет применения подходов трехмерной идентификации объектов недвижимости, в том числе с использованием технологий лазерного сканирования, что позволит повысить информативность мониторинга земель и расширить возможности цифрового анализа территорий.

БЛАГОДАРНОСТИ Исследование проводилось при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № LAB-24.1/2.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Бенц Д.С. Эффективность пространственного развития территории как индикатор оценки деятельности региональной власти: кейс Челябинской области // Управленец. 2021. Т. 12, № 6. С. 49–66. DOI:10.29141/2218-5003-2021-12-6-4.
 2. Проскурнова К.Ю. Пространственное планирование vs территориальное планирование — проблематика содержания видов регионального планирования // Региональная экономика: Теория и практика. 2021. Т. 19, № 10(493). С. 1897–1913. DOI:10.24891/re.19.10.1897.
 3. Анучина Д.А. Концептуальные подходы к изучению проблемы пространственного развития и пространственной поляризации в зарубежной и отечественной научной литературе // Событийная экономика как возможность решения национальных задач современности: сборник научных статей по итогам Национальной межвузовской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 2 июня 2022 г.). СПб.: СПбГЭУ, 2022. С. 51–67.
 4. Безрукова Н.А., Вагин Д.Ю., Жулькова Ю.Н. и др. Пространственное развитие территорий как фактор экономических и социальных преобразований // Российский экономический бюллетень. 2021. Т. 4, № 3. С. 68–74.
 5. Соловьева Е.Д., Митрофанова Н.О. Роль геопорталов в управлении земельно-имущественным фондом муниципальных образований // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопропространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов Национальной научно-практической конференции: в 3 ч. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Ч 3. С. 122–131. DOI:10.33764/2687-041X-2021-3-122-131.
 6. Стрекаловская М.И. Региональные и муниципальные геопорталы в планировании использования земельных ресурсов // Вестник АГАТУ. 2022. № 2(6). С. 112–117.
 7. Павлова В.А., Степанова Е.А., Уварова Е.Л. Проектирование информационной базы инвентаризации земель сельскохозяйственного назначения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 2. С. 200–208. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-200-208.
 8. Орлов П.Ю., Журкин И.Г., Камынина Н.Р. и др. Анализ опыта оценки природно-ресурсного потенциала и устойчивого развития территорий // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67, № 4. С. 45–64. DOI:10.30533/GiA-2023-030.
 9. Меданова К.В., Балтабеков С.А. Геоинформационные технологии как основа создания картографического материала для мониторинга земель лесного фонда // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 86–99. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-86-99.

10. Тарарин А.М., Беляев В.Л. Пространственные данные в градостроительной деятельности // Геодезия и картография. 2020. № 11. С. 29–39. DOI:10.22389/0016-7126-2020-965-11-29.
11. Чичкова Е.Ф., Кочин Д.А., Рогачев С.А. Информационно-аналитический сервис: подход к анализу геопространственных данных спутникового мониторинга // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 4. С. 375–379. DOI:10.17586/0021-3454-2024-67-4-375-379.
12. Шевин А.В. Геопорталы как базовые элементы инфраструктуры пространственных данных: анализ текущего состояния вопроса в России // Вестник СГУГиТ. 2016. № 3(35). С. 102–110.
13. Брылев И.С., Бударова В.А. Миссия геоинформационных систем в обеспечении пространственного развития территорий // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов VII Национальной научно-практической конференции с международным участием. В 3 ч. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. Ч. 1. С. 68–73. DOI:10.33764/2687-041X-2024-1-68-73.
14. Тарарин А.М. Понятие и классификация земельно-информационных систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 2. С. 221–231. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-221-231.
15. Jiang H., Van Genderen J., Mazzetti P., et al. Current status and future directions of geoportals // International Journal of Digital Earth. 2020. Vol. 13. No. 10. P. 1093–1114. DOI:10.1080/17538947.2019.1603331.

АВТОРЫ **Гура Дмитрий Андреевич**

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина»,
Краснодар, Россия;

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ),
Краснодар, Россия

кафедра кадастра и геоинженерии,

Институт строительства и транспортной инфраструктуры

канд. техн. наук, доцент

 0000-0002-2748-9622

Кузякина Марина Викторовна

 marinavkuzyakina@gmail.com

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ),
Краснодар, Россия;

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (КубГУ), Краснодар, Россия
кафедра геоинформатики, Институт географии, геологии, туризма и сервиса

канд. физ.-мат. наук

 0000-0003-0492-3630

Тихонов Тимофей Андреевич

 timka2015@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ),
Краснодар, Россия

кафедра кадастра и геоинженерии,

Институт строительства и транспортной инфраструктуры

Карагян Арсен Ваагнович

 karagyan.arsen@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (КубГУ), Краснодар, Россия
кафедра геоинформатики, Институт географии, геологии, туризма и сервиса

 0000-0001-9673-9114

Поступила 10.03.2024. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Identification of the Krasnodar Territory's Land Resources in Order to Study Land Dynamics

**Dmitry A. Gura^{1,2}✉, Marina V. Kuzyakina^{1,3},
Timofey A. Tikhonov¹, Arsen V. Karagyan^{1,3}**

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

² Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

³ Kuban State University, Krasnodar, Russia

✉ gda-kuban@mail.ru

CITATION Gura DA, Kuzyakina MV, Tikhonov TA, Karagyan AV. Identification of the Krasnodar Territory's Land Resources in Order to Study Land Dynamics. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 115–124. DOI:10.30533/GiA-2025-053.

KEYWORDS land resources, geoportal, decryption, land cover classification, land management

ABSTRACT The paper presents a methodology for determining land use types using global geographic portals. The authors compared the results of land resource identification using data from global geographic portals, selected a test site and satellite images to construct land fund maps, and applied various interpretation tools on temporal and spatial scales. As a result of the comparative analysis, two geographic portals were selected to obtain data: Copernicus Land Monitoring Service and ESA World Cover. The Krasnodar territory, which is represented on all global geographic portals under study, was chosen as a test site for identification. The goal of the study was to obtain reliable data on land resource categories using remote sensing data reflected in modern global geographic portals. In the process of interpreting the materials, significant discrepancies were identified in the indicators obtained from different geographic portals. As a result of interpreting the Earth remote sensing data and identifying land resources in dynamics from 2015 to 2019, maps of the selected territory were compiled and both predominant and less common types of vegetation were identified, and built-up lands in the study areas were interpreted.

ACKNOWLEDGEMENTS The study was conducted with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of project No. LAB-24.1/2.

REFERENCES

1. Bents DS. Effektivnost' prostranstvennogo razvitiya territorii kak indikator otsenki deyatel'nosti regional'noy vlasti: keys Chelyabinskoy oblasti [Efficiency of spatial development of the territory as an indicator for assessing the activities of regional authorities: the case of the Chelyabinsk region]. *Manager*. 2021;12(6): 49–66. (In Russian). DOI:10.29141/2218-5003-2021-12-6-4.
2. Proskurnova KY. Prostranstvennoe planirovanie vs territorial'noe planirovanie – problematika sodержaniya vidov regional'nogo planirovaniya [Spatial planning vs. territorial planning – the problematic of the content of types of regional planning]. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2021;19(10): 1897–1913. (In Russian). DOI:10.24891/re.19.10.1897.
3. Anuchina DA. Kontseptual'nye podkhody k izucheniyu problemy prostranstvennogo razvitiya i prostranstvennoy polarizatsii v zarubezhnoy i otechestvennoy nauchnoy literature [Conceptual approaches to the study of the problem of spatial development and spatial polarization in foreign and domestic scientific literature]. *Event Economy as an Opportunity to Solve National Problems of Our Time: Proceedings of the National Interuniversity Scientific and Practical Conference (St. Petersburg, June 2, 2022)*. St. Petersburg: SPbSUE; 2022: 51–67. (In Russian).
4. Bezrukova NA, Vagin DYu, Zhul'kova YuN, et al. Prostranstvennoe razvitie territoriy kak faktor ekonomicheskikh i sotsial'nykh preobrazovaniy [Spatial development of territories as a factor of economic and social transformations]. *Russian Economic Bulletin*. 2021;4(3): 68–74. (In Russian).
5. Solov'eva ED, Mitrofanova NO. Rol' geoportalov v upravlenii zemel'no-imushchestvennym fondom munitsipal'nykh obrazovaniy [The role of geoportals in the management of land and property funds of municipalities]. *Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*. In 3 parts. Novosibirsk: SSUGT; 2021;3: 122–131. (In Russian). DOI:10.33764/2687-041X-2021-3-122-131.
6. Strekalovskaya MI. Regional'nye i munitsipal'nye geoportaly v planirovanii ispol'zovaniya zemel'nykh resursov [Regional and municipal geoportals in land use planning]. *Vestnik ASAU*. 2022;2(6): 112–117. (In Russian).
7. Pavlova VA, Stepanova EA, Uvarova EL. Proektirovanie informatsionnoy bazy inventarizatsii zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Design of an information base for inventory of agricultural lands]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotogrammetry*. 2021;65(2): 200–208. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-200-208.
8. Orlov PYu, Zhurkin IG, Kamynina NR, et al. Analiz opyta otsenki prirodno-resursnogo potentsiala i ustoychivogo razvitiya territoriy [Analysis of experience in assessing natural resource potential and sustainable development of territories]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotogrammetry*. 2023;67(2): 45–64. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-030.
9. Medanova KV, Baltabekov SA. Geoinformatsionnye tekhnologii kak osnova sozdaniya kartograficheskogo materiala dlya monitoringa zemel' lesnogo fonda [Geoinformation technologies as a basis for creating cartographic material for monitoring forest lands]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(2): 89–99. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-86-99.
10. Tararin AM, Belyaev VL. Prostranstvennye dannye v gradostroitel'noy deyatel'nosti [Spatial data in urban planning activities]. *Geodesy and Cartography*. 2020;81(11): 29–39. DOI:10.22389/0016-7126-2020-965-11-29-39.
11. Chichkova EF, Kochin DA, Rogachev SA. Informatsionno-analiticheskiy servis: podkhod k analizu geoprostranstvennykh dannykh sputnikovogo monitoringa [Information and analytical service: an approach to the analysis of geospatial data from satellite monitoring]. *Journal of Instrument Engineering*. 2024;67(4): 375–379. (In Russian). DOI:10.17586/0021-3454-2024-67-4-375-379.
12. Shevin AV. Geoportaly kak bazovye elementy infrastruktury prostranstvennykh dannykh: analiz tekushchego sostoyaniya voprosa v Rossii [Geoportals as Basic Elements of Spatial Data Infrastructure: Analysis of the Current State of the Issue in Russia]. *Vestnik SSUGT*. 2016;3(35): 102–110. (In Russian).
13. Brylev IS, Budarova VA. Missiya geoinformatsionnykh sistem v obespechenii prostranstvennogo razvitiya territoriy [The mission of geographic information systems in ensuring spatial development of territories]. *Regulation of Land and Property Relations*

in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions: Proceedings of the VII National Scientific and Practical Conference with international participation. In 3 parts. Novosibirsk: SSUGT; 2024;1: 68–73. (In Russian). DOI:10.33764/2687-041X-2024-1-68-73.

14. Tararin AM. Ponyatie i klassifikatsiya zemel'no-informatsionnykh sistem [Concept and classification of land information systems]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(2): 221–231. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2020-965-11-29-39.
15. Jiang H, Van Genderen J, Mazzetti P, et al. Current status and future directions of geoportals. *International Journal of Digital Earth*. 2020;13(10): 1093–1114. DOI:10.1080/17538947.2019.1603331.

AUTHORS **Dmitry A. Gura**

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia;
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
Department of Cadastre and Geoengineering,
Institute of Construction and Transport Infrastructure
PhD in Engineering, Associate Professor
 0000-0002-2748-9622

Marina V. Kuzyakina

 marinavkuzyakina@gmail.com
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia;
Kuban State University, Krasnodar, Russia
Department of Geoinformatics, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service
PhD in Physics and Mathematics
 0000-0003-0492-3630

Timofey A. Tikhonov

 timka2015@yandex.ru
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
Department of Cadastre and Geoengineering,
Institute of Construction and Transport Infrastructure

Arsen V. Karagyan

 karagyan.arsen@yandex.ru
Kuban State University, Krasnodar, Russia
Department of Geoinformatics, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service
 0000-0001-9673-9114

Submitted: March 10, 2024. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



Разработка программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории

Д.А. Букреев¹✉, Е.Г. Черных¹, А.П. Сизов²

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

✉ bukadimka37@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Букреев Д.А., Черных Е.Г., Сизов А.П. Разработка программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 125–135. DOI:10.30533/GiA-2025-044.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА программный модуль, территориальное планирование, геоинформационная система, средоформирующий потенциал, мониторинг окружающей среды

АННОТАЦИЯ В условиях постоянного изменения окружающей среды и стремительной урбанизации государство ежедневно сталкивается с принятием решений в области территориального планирования. В целях обеспечения рационального использования природных ресурсов и ограничения воздействия негативных процессов необходим комплексный подход к управлению территориями. Регионом исследования в данной работе явилась Тюменская область, отличающаяся своей нефтегазоносностью, большими площадями земель лесного фонда и земель сельскохозяйственного назначения. Статья посвящена разработке программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории Тюменской области, что позволит оптимизировать процесс принятия решений на различных ведомственных уровнях при территориальном планировании в отношении ценных категорий земель. Предлагаемая методика представлена на базе программного обеспечения QGIS. Она включает в себя ряд этапов, начиная с выбора и анализа исходных данных и заканчивая визуализированным результатом работ. В качестве инструмента генерации данных разработан программный модуль с использованием языка программирования PyQt5 для QGIS. За счет обработки большого объема информации, повышения точности анализа применение методики может оптимизировать сотрудничество между различными уровнями власти и общества, что позволит создать комфортные условия на территории населенных пунктов

и за их пределами. Такой инструмент может быть использован для исследований в области сельского хозяйства, экологии и охраны окружающей среды при разработке стратегий и планов развития территорий на различных уровнях.

1 Введение

В условиях стремительной глобальной урбанизации и изменений окружающей среды все большее значение приобретает территориальное планирование. При этом задачи, связанные с мониторингом земель и территориальным планированием, требуют комплексного подхода и применения современных технологий. Важным инструментом управления различными территориями являются специализированные авторские программные продукты, которые позволяют обрабатывать и анализировать информацию, генерировать отчеты о социально-экономических факторах и природных ресурсах исследуемой территории.

Одним из основных показателей окружающей среды выступает средоформирующий потенциал территории. Его аналитическая оценка оказывает влияние на принятие решений в области территориального планирования. Средоформирующий потенциал территории является универсальным показателем, который может охватывать разные уровни (локальный, региональный, национальный), объяснять текущие процессы, выявлять потенциальные риски и перспективы для улучшения территориального планирования [1, 2].

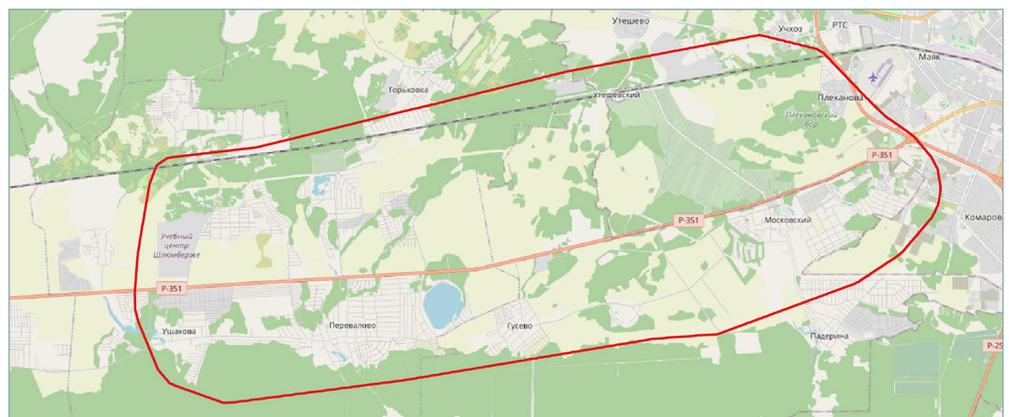
Создание программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории способно повысить эффективность принятия решений в области территориального планирования. Генерация большого объема информации, повышение точности анализа облегчают сотрудничество между различными уровнями публичной власти и общества, что позволяет создать комфортные условия на территории населенных пунктов и за их пределами.

Разработка специализированного программного модуля требует интеграции геоинформационной системы и статистических данных. Такое сочетание дает возможность не только собирать данные, но и обрабатывать их. Визуализация информации является еще одним инструментом научных исследований, позволяющим учитывать уникальные характеристики конкретных областей.

2 Материалы и методы

В качестве исследуемой территории рассматривается часть Тюменского района Тюменской области России в западном направлении от города Тюмени, включающая в себя ряд населенных пунктов (рис. 1).

Рис. 1 
Территория исследования
Fig. 1
Territory of research



Создание программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории включает в себя несколько этапов.

I. Выбор и получение спутниковых изображений

На исследуемую территорию были получены панхроматические и многозональные снимки со спутника SPOT 6, выполненные 16 августа 2023 года (рис. 2).

Рис. 2 ➤

Пример снимка со спутника SPOT 6 (дата съемки 16 августа 2023 г.)

Fig. 2

Example of a photo from the SPOT 6 satellite (date of shooting August 16, 2023)



II. Предварительная обработка снимков

В обработке задействован ряд инструментов для комплексного улучшения качества изображения. Сначала проводится атмосферная коррекция спутникового снимка, затем выполняется паншарпенинг (*англ.* panchromatic sharpening), а в заключение — ортотрансформирование, чтобы повысить точность изображения и исключить искажения спутникового снимка.

III. Тематическое дешифрирование снимков и классификация объектов

Этот этап включает в себя анализ спутниковых изображений с целью выявления различных объектов и явлений на поверхности Земли [3]. Векторные данные, полученные в результате обработки растровых изображений, позволили сформировать слои ряда сельскохозяйственных угодий: пашни, многолетние насаждения, залежи и т. д. (рис. 3). Спутниковый снимок представляется в векторной форме по рассчитанным значениям индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (рис. 4).

Рис. 3 ➤

Оцифрованное изображение угодий различных видов

Fig. 3

Digitized image of lands of different types

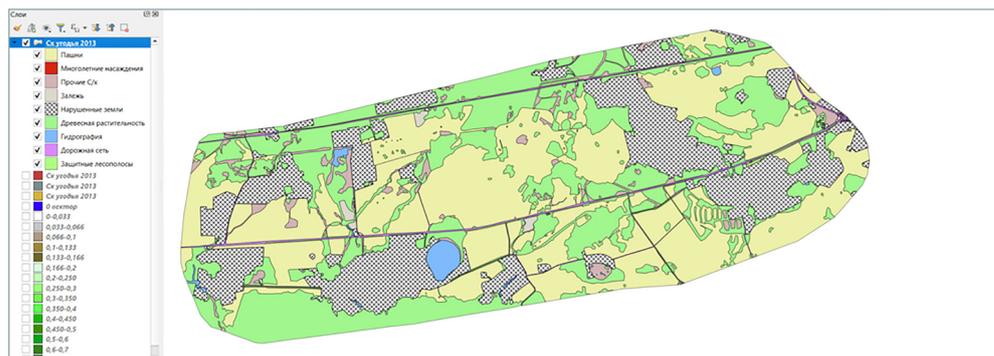
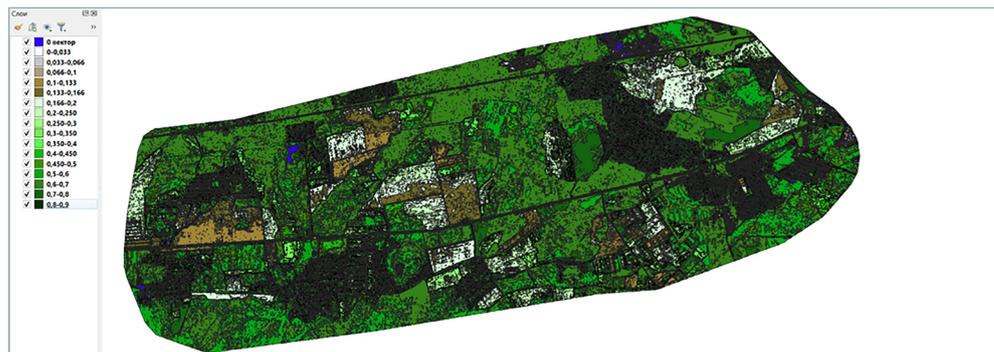


Рис. 4 ➤

Спутниковый снимок в векторной форме по значениям индекса NDVI

Fig. 4

Satellite image in vector form based on NDVI index values



IV. Создание атрибутивной таблицы

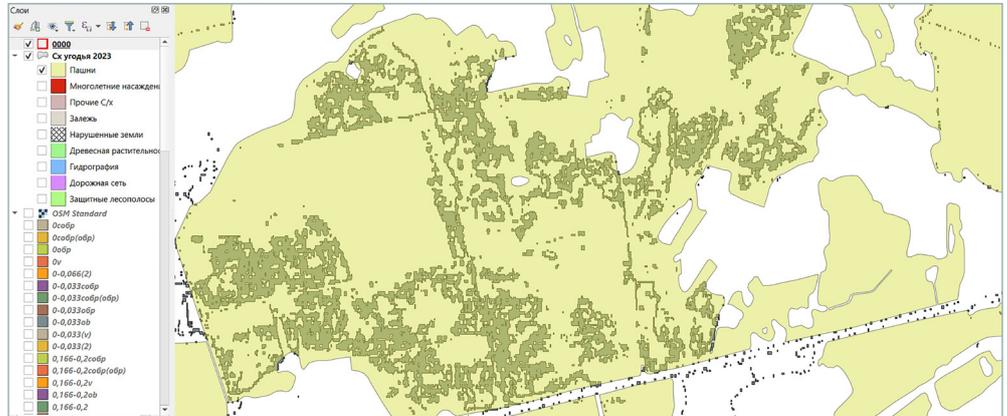
Путем сопоставления растровых и векторных слоев производится количественное вычисление значений индекса внутри границ каждого отдельного типа сельскохозяйственных угодий. В пределах значений индекса NDVI от 0,45 до 0,50 находится 62 402 элементарных ячеек внутри контура «Пашня» (рис. 5). Элементарная ячейка (единица растра) — это пиксель, равный 100 м² на местности, соответствующий разрешению спутникового снимка.

Рис. 5

Векторный слой значения индекса NDVI от 0,45 до 0,50 для контура «Пашня»

Fig. 5

Vector layer of NDVI index values from 0.45 to 0.50 for the “Arable land” contour



Производится расчет распределения индекса в промежутках от -1,00 до 1,00. Полученные результаты заносятся в обобщенную таблицу по типам сельскохозяйственных угодий с учетом количества соответствующих элементарных ячеек (единиц растра) (табл. 1) [4].

Таблица 1

Сводная таблица распределения значений индекса NDVI в соответствии с видом сельскохозяйственного угодья

Table 1

Summary table of the distribution of NDVI index values according to the type of agricultural land

Категория и вид угодья	Количество контуров	Количество ячеек	Интервал NDVI
1 — «Пашня»	1	0	-1,00...-0,00
		33	0,00...0,033
		104	0,033...0,066
		247	0,066...0,10
		12 755	0,10...0,133
		18 468	0,133...0,166
		10 106	0,166...0,20
		8304	0,20...0,25
		8538	0,25...0,30
		19 516	0,30...0,35
		33 490	0,35...0,40
		81 251	0,40...0,45
		62 402	0,45...0,50
		141 006	0,50...0,60
78 235	0,60...0,70		
17 665	0,70...0,80		
80	0,80...0,90		
0	0,90...1,00		
Итого	1	492 200	-1,00...0,00

Расчет значений индекса проводится по каждому виду сельскохозяйственных угодий для получения полной информации в рамках определенного периода.

V. Интеграция данных

Полученные данные интегрируются в разработанный авторами на базе QGIS программный модуль.

VI. Анализ и интерпретация данных

На последнем этапе проводятся анализ полученных данных и их интерпретация с целью получения полезной информации о пространственно-временной динамике средоформирующего потенциала территории [5, 6].

VII. Визуализация результатов

Результаты анализа данных визуализируются с помощью карт, графиков и других средств, что позволяет наглядно представить пространственное распределение различных объектов и явлений¹.

Расчет таблиц с такими данными может занимать много времени и требовать значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет оперативное получение результатов и их анализ. Использование предложенного программного модуля позволяет упростить и ускорить процесс работы с большими данными. Благодаря структурированному хранению данных и применению специализированных языков запросов становится возможным эффективно манипулировать данными, сокращая время на их обработку и анализ, а также повышая точность и актуальность получаемых результатов [7, 8].

3 Результаты и обсуждение

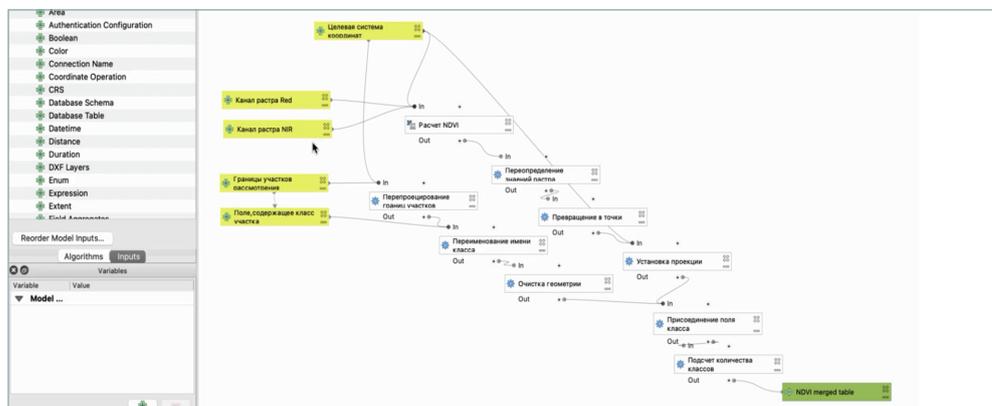
На базе геоинформационной системы QGIS представлен разработанный программный модуль для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории.

Специализированный программный модуль представляет собой инструмент, который позволяет генерировать необходимую информацию, анализировать ее и управлять ею. Текстовая информация приведена в сводной таблице распределения значений индекса NDVI в соответствии с видом сельскохозяйственного угодья (табл. 1): номер и название угодья, количество контуров, количество элементарных ячеек внутри контура и значение индекса NDVI. Графическая информация отображена на спутниковых снимках 2013, 2019 и 2023 годов.

Структура программного модуля представлена в форме сетевой модели (рис. 6). Такая модель представляет информацию в виде древовидной структуры, показывая связи между узлами. Узлы отображают параметры модели, т. е. на базе красного и инфракрасного каналов растра производится расчет индекса NDVI.

Рис. 6  Сетевая модель программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории

Fig. 6 Network model of a software module for assessing the spatio-temporal dynamics of the environment-forming potential of a territory



1 Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И. и др. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие. Пермь: ПГНИУ, 2020. 191 с.

С помощью данных о системе координат и границах угодий границы земельного участка проецируются для графического отображения информации.

Для повышения оптимизации расчетных процедур элементарных ячеек индекса NDVI разработанный модуль позволяет рассчитать количество элементарных ячеек внутри каждого угодья за выбранный год и вычислить частотное распределение NDVI [9–11].

Для более развернутого анализа исследуемых данных модуль попеременно позволяет выбирать спутниковые снимки в зависимости от года. В данном исследовании, как указано выше, были использованы снимки 2013, 2019 и 2023 годов.

Принцип работы модуля осуществляется путем выбора необходимого угодья. Рассмотрим это подробнее на примере угодья «Пашня» (рис. 7). Для данного угодья предложенный модуль просчитывает количество элементарных ячеек внутри контура и вычисляет частотное распределение индекса NDVI [12, 13].

Рис. 7  Выделенный фрагмент угодья «Пашня» за 2023 г.

Fig. 7 Selected fragment of the land “Arable land” for 2023



На примере угодья «Пашня» представлен автоматический расчет частотного распределения NDVI по интервалам за 2013, 2019, 2023 годы (рис. 8, 9).

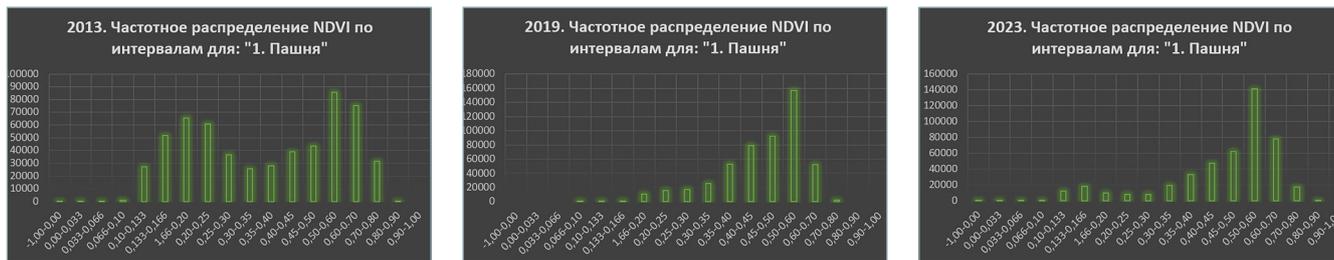
Рис. 8  Фрагмент программного модуля QGIS для расчета индекса NDVI в рамках угодья «Пашня» за 2023 г.

Fig. 8 A fragment of the QGIS software module for calculating the NDVI index within the “Arable land” for 2023



Рис. 9  Фрагменты программного модуля QGIS для расчета индекса NDVI в рамках угодья «Пашня» за 2013, 2019 и 2023 гг.

Fig. 9 Fragments of the QGIS software module for calculating the NDVI index within the “Arable land” for 2013, 2019 and 2023



4 Выводы

В работе рассмотрены вопросы разработки программного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории. Предложен практический компонент работы модуля на примере Тюменского района Тюменской области России. Методика разработки модуля опирается на программное обеспечение QGIS, которое позволило интегрировать исходную графическую информацию для дальнейшего анализа. Рассмотрена основная архитектура специализированного модуля, описаны свойства и характеристики исходных данных. Предложенный авторами модуль отображает основные связи внутри своей сетевой модели.

Модуль разработан с использованием высокоуровневого языка программирования Python, что обеспечивает пользователю повышенную производительность, формирует быстрое считывание кодировок, влияя на их качество, а также предоставляет возможность обмена разрабатываемым программным обеспечением в виде переноса на аналогичные системы, использующие тот же язык программирования. Разработанный программный модуль базируется на QGIS, представляющей собой геоинформационную систему с открытым кодом (таким образом, она является бесплатной, что подтверждает ее целесообразность) [14, 15].

Данный инструмент может быть использован как частными, так государственными учреждениями для исследований в области сельского хозяйства, экологии и охраны окружающей среды при разработке стратегий и планов развития застроенных и подлежащих застройке территорий. Поэтапное внедрение предложенного модуля для оценки пространственно-временной динамики средоформирующего потенциала территории в автоматизированную систему государственного экологического мониторинга земель будет способствовать успешной разработке стратегических и программных документов развития муниципальных образований, а также более эффективному использованию природных ресурсов и сохранению экологического баланса на планете.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Сизов А.П., Черных Е.Г., Шукина В.Н. и др. Характеристика оптимальности структуры угодий по результатам исчисления средоформирующего потенциала территории // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию юбилею кафедры геодезии и дистанционного зондирования. Омск: Омский ГАУ, 2023. С. 482–486.
2. Емельянов А.А., Ерешко М.В., Сизов О.С. и др. Обзор современных облачных платформ обработки и аналитики данных ДЗЗ и информационных продуктов на их основе // Исследование Земли из космоса. 2022. № 2. С. 72–87. DOI:10.31857/S020596142202004X.
3. Черкасов А.А., Махмудов Р.К., Сопнев Н.В. Пространственный анализ городов и агломераций: интеграция технологий ГИС и Big Data // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 4. С. 95–112. DOI:10.37493/2308-4758.2021.4.6.
4. Черемисин Д.Г., Мкртчян В.Р. Актуальность применения искусственного интеллекта при решении геодезических задач // Символ науки: международный научный журнал. 2022. № 12-2. С. 39–40.
5. Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Разработка систем регионального мониторинга земель на основе атласного картографирования // Известия Томского политехнического института. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 7. С. 66–83.
6. Колесников А.А. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 3. С. 74–94. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94.
7. Гура Д.А., Дубенко Ю.В., Марковский И.Г. Разработка концепции интеллектуального блока обработки данных в системе мониторинга мостов с применением сканирующих технологий // Известия высших учебных

- заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 2 (54). С. 14–24. DOI:10.21685/2072-3059-2020-2-2.
8. Drobež P., Grigillo D., Lisec A., et al. Remote sensing data as a potential source for establishment of the 3D cadastre in Slovenia // Geodetski vestnik. 2016. Vol. 60. No. 3. P. 392–422. DOI:10.15292/GEODETSKI-VESTNIK.2016.03.392-422.
 9. Масютенко Н.П., Чуян Н.А., Кузнецов А.В. и др. Система оценки ресурсного потенциала агроландшафтов для формирования экологически сбалансированных агроландшафтов. Курск: ГНУ ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2012. 67 с.
 10. Хатиб А., Малинников В.А. Автоматизированная классификация растительного покрова средиземноморского ландшафта по космическим изображениям высокого пространственного разрешения с учетом спектрально-текстурных и топографических признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 2. С. 51–63. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-2-51-63.
 11. Minville-Gallagher M. L’Afrique de l’Ouest a l’heure des acquisitions massives de terres // Revue Possibles. 2013. Vol. 36. No. 3. P. 60–72. DOI:10.62212/revuepossibles.v36i3.371.
 12. Colin J.-Ph., Le Meur P-Y., Léonard É. Les politiques d’enregistrement des droits fonciers. Du cadre légal aux pratiques locales. Paris: Karthala, 2009. 534 p.
 13. Беленко В.В. Концепция и технология мониторинга земель застраиваемых территорий по материалам космической съемки: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 209 с.
 14. Лебедев Ю.В. Эколого-экономическая оценка средоформирующего потенциала лесных ландшафтов Красноярского края // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 166–173.
 15. Дубровский А.В. Методические подходы к моделированию и прогнозированию рационального использования земельных ресурсов с применением геотехнологий // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 3. С. 145–156. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-3-145-156.

АВТОРЫ Букреев Дмитрий Александрович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ), Тюмень, Россия
кафедра геодезии и кадастровой деятельности, Институт сервиса и отраслевого управления
 0009-0001-0756-834X

Черных Елена Германовна

 chernyheg@tyuiu.ru
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ), Тюмень, Россия
кафедра геодезии и кадастровой деятельности, Институт сервиса и отраслевого управления
д-р техн. наук, доцент
 0000-0002-2644-4721

Сизов Александр Павлович

 ap_sizov@mail.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра землеустройства и кадастра, факультет управления территориями
д-р техн. наук, профессор
 0000-0001-6175-0145

Поступила 09.03.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Development of a Software Module for Assessing the Spatio-Temporal Dynamics of the Environment-Forming Potential of a Territory

D.A. Bukreev¹✉, E.G. Chernykh¹, A.P. Sizov²

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

✉ bukadimka37@gmail.com

CITATION Bukreev DA, Chernykh EG, Sizov AP. Development of a Software Module for Assessing the Spatio-Temporal Dynamics of the Environment-Forming Potential of a Territory. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 125–135. DOI:10.30533/GiA-2025-044.

KEYWORDS software module, spatial planning, geographic information system, environmental potential, environmental monitoring

ABSTRACT In the context of constant environmental change and rapid urbanization, the state is faced with making decisions in the field of territorial planning every day. In order to ensure the rational use of natural resources and limit the impact of negative processes, an integrated approach is needed for effective territorial management. The territory of research in this work was the Tyumen region, which is distinguished by its oil and gas potential, large areas of forest lands and agricultural lands. This work is devoted to the development of a software module for assessing the spatio-temporal dynamics of the environment-forming potential of the territory, which will optimize the decision-making process in the field of territorial planning at various levels. The proposed methodology is presented on the basis of QGIS software. The methodology includes the stages of work, starting from the selection and analysis of initial data to the visualized result of the work. As a data processing tool, a software module has been developed using the PyQt5 programming language for QGIS. The application of such a tool can be used for research in the field of agriculture, ecology and environmental protection in the development of strategies and plans for the development of territories at various levels.

- REFERENCES**
1. Sizov AP, Chernykh EG, Shchukina VN, et al. Kharakteristika optimal'nosti struktury ugodij po rezul'tatam ischisleniya sredoformiruyushhego potentsiala territorii [Characteristics of the optimality of the land structure based on the results of calculating the environment-forming potential of the territory]. *Geodesy*,

- Land Management and Cadastres: Problems and Development Prospects: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference dedicated to the 105th anniversary of the Department of Geodesy and Remote Sensing.* Omsk: Omsk SAU; 2023: 482–486. (In Russian).
2. Emelianov AA, Ereshko MV, Sizov OS, et al. Obzor sovremennykh oblachnykh platform obrabotki i analitiki dannykh DZZ i informatsionnykh produktov na ikh osnove [Review of modern cloud platforms for processing and analyzing remote sensing data and information products based on them]. *Earth Exploration from Space.* 2022;2: 72–87. (In Russian). DOI:10.31857/S020596142202004X.
 3. Cherkasov AA, Makhmudov RK, Sopnev NV. Prostranstvennyj analiz gorodov i aglomeratsij: integratsiya tekhnologij GIS i Big Data [Spatial analysis of cities and agglomerations: integration of GIS and Big Data technologies]. *Science. Innovations. Technologies.* 2021;4: 95–112. (In Russian). DOI:10.37493/2308-4758.2021.4.6.
 4. Cheremisin DG, Mkrtchyan VR. Aktual'nost' primeneniya iskusstvennogo intellekta pri reshenii geodezicheskikh zadach [Relevance of using artificial intelligence in solving geodetic problems]. *Symbol of Science: international scientific journal.* 2022;12-2: 39–40. (In Russian).
 5. Verkhoturov AA, Melkiy VA. Razrabotka sistem regional'nogo monitoringa zemel' na osnove atlasnogo kartografirovaniya [Development of regional land monitoring systems based on atlas mapping]. *Izvestiya. Tomsk Polytechnic Institute. Engineering of Georesources.* 2016;327(7): 66–83. (In Russian).
 6. Kolesnikov AA. Analiz metodov i sredstv iskusstvennogo intellekta dlya analiza i interpretatsii dannykh aktivnogo distantsionnogo zondirovaniya [Analysis of artificial intelligence methods and tools for analyzing and interpreting active remote sensing data]. *Vestnik SSUGT.* 2022;27(3): 74–94. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94.
 7. Gura DA, Dubenko YuV, Markovsky IG. Razrabotka kontseptsii intellektual'nogo bloka obrabotki dannykh v sisteme monitoringa mostov s primeneniem skaniruyushchikh tekhnologij [Development of the concept of an intelligent data processing unit in a bridge monitoring system using scanning technologies]. *University proceedings. Volga region. Technical sciences.* 2020;2(54): 14–24 (In Russian). DOI:10.21685/2072-3059-2020-2-2.
 8. Drobež P, Grigillo D, Lisec A, et al. Remote sensing data as a potential source for the establishment of the 3D cadaster in Slovenia. *Geodetski vestnik.* 2016;60(3): 392–422. DOI:10.15292/GEODETSKI-VESTNIK.2016.03.392-422.
 9. Masyutenko NP, Chuyan NA, Kuznetsov AV, et al. *Sistema otsenki resursnogo potentsiala agrolandshaftov dlya formirovaniya ehkologicheskimi sbalansirovannykh agrolandshaftov* [System for assessing the resource potential of agrolandscapes for the formation of ecologically balanced agrolandscapes]. Kursk: GNU VNIIZiZPE RAAS; 2012. 67 p. (In Russian).
 10. Khatib A, Malinnikov VA. Avtomatizirovannaya klassifikatsiya rastitel'nogo pokrova sredizemnomorskogo landshafta po kosmicheskim izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya s uchetom spektral'no-teksturnykh i topograficheskikh priznakov [Automated classification of the vegetation cover of the Mediterranean landscape based on high spatial resolution space images taking into account spectral-textural and topographic features]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* 2021;18(2): 51–63. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-2-51-63.
 11. Minville-Gallagher M. L'Afrique de l'Ouest a l'heure des acquisitions massives de terres [West Africa at the time of massive land acquisitions]. *Revue Possibles.* 2013;36(3): 60–72. (In French). DOI:10.62212/revuepossibles.v36i3.371.
 12. Colin JPh, Le Meur PY, Leonard E. *Les politiques d'enregistrement des droits fonciers. Du cadre légal aux pratiques locales* [Land rights registration policies. From the legal framework to local practices]. Paris: Karthala; 2009. 534 p. (In French).
 13. Belenko VV. *Koncepciya i tekhnologiya monitoringa zemel' zastraivaemykh territorij po materialam kosmicheskoy s''emki* [Concept and technology of monitoring lands of developed territories based on space imagery] [dissertation]. Moscow; 2019. 209 p. (In Russian).
 14. Lebedev YuV. *Ekologo-ehkonomicheskaya otsenka sredoformiruyushhego potentsiala lesnykh landshaftov Krasnoyarskogo kraya* [Ecological and economic assessment

- of the environment-forming potential of forest landscapes of Krasnoyarsk Krai]. *Geography and Natural Resources*. 2013;2: 166–173. (In Russian).
15. Dubrovsky AV. Metodicheskie podkhody k modelirovaniyu i prognozirovaniyu ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel'nykh resursov s primeneniem geotekhnologij [Methodological approaches to modeling and forecasting the rational use of land resources using geotechnologies]. *Vestnik SSUGT*. 2022;27(3): 145–156. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-3-145-156.

AUTHORS **Dmitry A. Bukreev**

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Department of Geodesy and Cadastral Activity,
Institute of Service and Industry Management
 0009-0001-0756-834X

Elena G. Chernykh

 chernyheg@tyuiu.ru
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Department of Geodesy and Cadastral Activity,
Institute of Service and Industry Management
Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor
 0000-0002-2644-4721

Alexander P. Sizov

 ap_sizov@mail.ru
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Land Use Planning and Cadastre, Faculty of Territorial Management
Dr. of Sci. (Engineering), Professor
 0000-0001-6175-0145

Submitted: March 09, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.



ПАМЯТИ

Леонида Анатольевича Коновалова

2 октября 2025 года после продолжительной болезни ушел из жизни старший преподаватель кафедры космического мониторинга и экологии Московского государственного университета геодезии и картографии Леонид Анатольевич Коновалов.

Леонид Анатольевич родился в 1957 году в Москве. С юных лет он проявлял интерес к наукам о Земле. В 1974 году поступил на географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, который окончил в 1979 году по специальности «Геоморфология». С этого времени профессиональная деятельность Л.А. Коновалова была неразрывно связана с наукой и преподаванием. Свою педагогическую и исследовательскую деятельность Леонид Анатольевич начал в МГУ, а с 1982 года и до конца жизни трудился в Московском государственном университете геодезии и картографии.

За годы работы в МИИГАиК он прошел путь от молодого преподавателя до настоящего специалиста в области дистанционного зондирования Земли и тематического дешифрирования космических снимков и карт. На протяжении многих лет он преподавал дисциплины «Геоморфология», «Тематическое дешифрирование», «Космический мониторинг» и другие профильные курсы, связанные с дистанционным зондированием и картографией. Особое место в его педагогической деятельности занимали летние выездные практики, во время которых он обучал студентов навыкам полевых наблюдений, визуального анализа рельефа и дешифрирования природных ресурсов Земли по спутниковым снимкам. Эти практики многие поколения студентов вспоминают с большой теплотой.

Леонид Анатольевич выпустил несколько учебно-методических пособий для студентов, а также опубликовал ряд научных статей по профессиональной тематике. Коллеги вспоминают его как доброжелательного и отзывчивого человека, для которого преподавание было не просто профессией, а любимым призванием. Несмотря на тяжелую болезнь, он до последнего оставался энергичным, собранным и внимательным к работе. Л.А. Коновалов запомнился всем, кто с ним работал и учился, как мудрый наставник, увлеченный исследователь и светлый, отзывчивый человек. Его уход стал невосполнимой утратой для коллективов кафедры космического мониторинга и экологии, кафедры географии и всего университета. Светлая память о Леониде Анатольевиче навсегда сохранится в сердцах коллег, друзей и студентов.

Коллектив авторов МИИГАиК