

ISSN 0536-101X  
e-ISSN 2618-7299

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ  
**ГЕОДЕЗИЯ**  
**И АЭРОФОТОСЪЕМКА**

Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying

**69 • 03 • 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 • 03 • 2025**

Москва, Россия

Moscow, Russia

# О журнале

<b>ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ</b>	Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъемка»
<b>СОКРАЩЕННОЕ НАЗВАНИЕ</b>	Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»
<b>СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ</b>	аэрокосмические исследования Земли, геодезия, геоинформатика, землеустройство, кадастр, картография, мониторинг земель, фотограмметрия, оптические и оптико- электронные приборы и комплексы
<b>ПЕРИОДИЧНОСТЬ</b>	6 выпусков в год
<b>ЯЗЫКИ</b>	русский, английский
<b>УЧРЕДИТЕЛЬ, ИЗДАТЕЛЬ</b>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК)
<b>СТРАНА, ГОРОД</b>	Россия, Москва
<b>ГОД ОСНОВАНИЯ</b>	1957
<b>ISSN</b>	0536-101X
<b>E-ISSN</b>	2618-7299
<b>ВЕБ-САЙТ</b>	<a href="http://www.miigaik.ru/gia">www.miigaik.ru/gia</a>
<b>ПОДПИСКА</b>	подписной индекс в Каталоге — 70365 Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ
<b>ИНДЕКСИРОВАНИЕ</b>	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
<b>ЛИЦЕНЗИЯ</b>	материалы журнала распространяются в открытом доступе по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

# About the Journal

<b>FULL INTERNATIONAL TITLE</b>	Proceedings of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerophotosurveying (Izvestiâ vysših učebnyh zavedenij. Geodeziâ i aèrofotos"emka)
<b>SHORT INTERNATIONAL TITLE</b>	Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying
<b>SUBJECT AREAS</b>	earth aerospace survey, geodesy, geoinformatics, land management, cadastre, cartography, land monitoring, photogrammetry, optical and optoelectronic devices and complexes
<b>FREQUENCY</b>	bimonthly (every two months)
<b>LANGUAGES</b>	Russian, English
<b>FOUNDED AND PUBLISHED BY</b>	Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)
<b>CITY, COUNTRY</b>	Moscow, Russia
<b>FOUNDED IN</b>	1957
<b>ISSN</b>	0536-101X
<b>E-ISSN</b>	2618-7299
<b>WEBSITE</b>	<a href="http://www.miigaik.ru/gia">www.miigaik.ru/gia</a>
<b>SUBSCRIPTION</b>	catalogue subscription number – 70365 (Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation)
<b>INDEXED IN</b>	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
<b>LICENSE</b>	the material is published on the basis of Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

# Редакционная коллегия

<b>ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР</b>	<b>Савиных Виктор Петрович</b>	академик РАН, д-р техн. наук, профессор; Россия
<b>ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА</b>	<b>Братков Виталий Викторович</b>	д-р геогр. наук; Россия
<b>ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ</b>	<b>Белоцерковский Андрей Владленович</b>	д-р физ.-мат. наук, профессор; Россия
	<b>Бондур Валерий Григорьевич</b>	академик РАН, д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Верещака Тамара Васильевна</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Гайрабеков Ибрагим Гиланиевич</b>	д-р техн. наук; Россия
	<b>Гвишиани Алексей Джерменович</b>	академик РАН, д-р физ.-мат. наук; Россия
	<b>Господинов Славейко</b>	д-р геодезии, профессор; Болгария
	<b>Денисенко Олег Валентинович</b>	д-р техн. наук; Россия
	<b>Журкин Игорь Георгиевич</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Кресс Вольфганг</b>	д-р техн. наук, профессор; Германия
	<b>Малинников Василий Александрович</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Мазурова Елена Михайловна</b>	д-р техн. наук; Россия
	<b>Нейман Юрий Михайлович</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Непоклонов Виктор Борисович</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Нехин Сергей Степанович</b>	д-р техн. наук; Россия
	<b>Оберст Петер Юрген</b>	д-р техн. наук, профессор; Германия
	<b>Хосе Хоакин Вилла Ортега</b>	канд. техн. наук; Колумбия
	<b>Пимшин Юрий Иванович</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Райзман Юрий Григорьевич</b>	канд. техн. наук; Россия
	<b>Сизов Александр Павлович</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Уставич Георгий Афанасьевич</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Холота Петр</b>	д-р техн. наук; Чехия
	<b>Чибуничев Александр Григорьевич</b>	д-р техн. наук, профессор; Россия
	<b>Шух Гаральд</b>	д-р техн. наук, профессор; Германия
	<b>Яшкин Станислав Николаевич</b>	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:**  
Журавлёва Е.Д.  
**Дизайн-макет:** Леднёва С.В.  
**Верстка:** Леднёва С.В.

**Подписано в печать 30.06.2025.**  
Гарнитура Source Serif Pro.  
Формат 60×90<sup>1/8</sup>.  
Бумага мелованная.  
Печать цифровая.  
Объем 25,75 усл. печ. л.  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 9. 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 30.06.2025.**  
Font Source Serif Pro.  
Format 60×90<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Coated paper.  
Digital print.  
25.75 printed sheet.  
500 copies. Order No. 9.

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

<b>ГЕОДЕЗИЯ</b>	<b>Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д.</b> Оценка эффективности моделей, используемых для ионосферной коррекции измерений ГНСС	<b>8</b>
	<b>Гусев И.В., Голубицкий А.М., Непоклонов В.Б.</b> Исследование вопросов развития координатного обеспечения	<b>22</b>
<b>АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ</b>	<b>Куен Динь Туен</b> Прогноз изменений типов прибрежных водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря с использованием модели SLAMM	<b>44</b>
<b>ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ</b>	<b>Богданова О.В., Меркурьева К.Р.</b> Разработка программного модуля для проведения оценки пространственного развития земель городской агломерации	<b>61</b>
	<b>Гвоздев О.Г.</b> Поведенческая декомпозиция: метод проектирования адаптивных геоинформационных технологий	<b>74</b>
	<b>Раметов Н.М., Табынов К.К., Байгурин Ж.Дж.</b> Картографирование трансграничных болезней в Казахстане с применением ГИС-технологий	<b>94</b>
	<b>Радченко Л.К.</b> Картографические приемы для реализации функций социального картографирования	<b>109</b>
<b>ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ</b>	<b>Баранова Д.В., Белоусов А.О., Павлова В.А.</b> Автоматизация расчетов интегральной оценки рационального использования земель сельскохозяйственного назначения (на примере Новгородской области)	<b>122</b>
	<b>Шалагин А.А., Григорьев С.А.</b> Сравнительный анализ моделей прогнозирования рыночной стоимости жилой недвижимости и влияние динамики рынка на кадастровую стоимость	<b>136</b>
	<b>Аврунев Е.И., Артемов А.В.</b> О термине «актуальное геопространство территориального образования»	<b>151</b>
	<b>Новиков С.С., Илюшина Т.В., Новикова П.Е.</b> Анализ нарушений вида разрешенного использования земельного участка по космическим снимкам и перспективы автоматизации данного процесса	<b>160</b>
	<b>Гура Д.А.</b> Анализ современных технологий трехмерной идентификации объектов недвижимости для решения задач 3D-кадастра	<b>175</b>
<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ</b>	<b>Гольгин Н.Х., Лысенко В.Г., Савиных В.П., Чугреев И.Г., Шилин В.А.</b> Методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений	<b>187</b>
<b>ХРОНИКА</b>	<b>Пространственные данные: наука и технологии — 2025</b>	<b>203</b>

<b>GEODESY</b>	<b>Kupriyanov A.O., Morozov D.A., Zamogilny D.</b>	<b>8</b>
	Assessment of the effectiveness of models used for ionospheric correction of GNSS measurements	
	<b>Gusev I.V., Golubitskiy A.M., Nepoklonov V.B.</b>	<b>22</b>
	Research on the development issues of coordinate support	
<b>EARTH AEROSPACE SURVEY, PHOTOGRAMMETRY</b>	<b>Quyên Dinh Tuyen</b>	<b>44</b>
	Prediction of changes in coastal wetland types due to sea-level rise using the SLAMM model	
<b>GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY</b>	<b>Bogdanova O.V., Merkurieva K.R.</b>	<b>61</b>
	Development of a software module for conducting an assessment of the spatial development of lands in an urban agglomeration	
	<b>Gvozdev O.G.</b>	<b>74</b>
	Behavior decomposition: adaptive geoinformational technologies design method	
	<b>Rametov N.M., Tabynov K.K., Baigurin Zh.J.</b>	<b>94</b>
	Mapping transboundary diseases in Kazakhstan using GIS technologies	
	<b>Radchenko L.K.</b>	<b>109</b>
	Cartographic techniques for implementing functions social mapping	
<b>LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING</b>	<b>Baranova D.V., Belousov A.O., Pavlova V.A.</b>	<b>122</b>
	Automation of calculations of the integrated assessment of the rational use of agricultural land (using the example of the Novgorod region)	
	<b>Shalagin A.A., Grigoriev S.A.</b>	<b>136</b>
	Comparative analysis of models for forecasting the market value of residential real estate and the impact of market dynamics on cadastral value	
	<b>Avrunev E.I., Artemov A.V.</b>	<b>151</b>
	On the term “actual geospace of territorial entities”	
	<b>Novikov S.S., Ilyushina T.V., Novikova P.E.</b>	<b>160</b>
	Analysis of violations of the type of permitted land plot use based on space images and prospects for automation of this process	
	<b>Gura D.A.</b>	<b>175</b>
	Analysis of modern technologies of three-dimensional identification of real estate objects for solving 3D-cadastré problems	
<b>OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS</b>	<b>Golygin N.H., Lysenko V.G., Savinykh V.P., Chugreev I.G., Shilin V.A.</b>	<b>187</b>
	Methods for improving the accuracy of angular spherical coordinates measurements of mobile coordinate measurement devices	
<b>CHRONICLE</b>	<b>Spatial Data: Science and Technology 2025</b>	<b>203</b>



# Оценка эффективности моделей, используемых для ионосферной коррекции измерений ГНСС

А.О. Куприянов<sup>1</sup>✉, Д.А. Морозов<sup>1</sup>, Д. Замогильный<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
✉ gnss@miigaik.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д. Оценка эффективности моделей, используемых для ионосферной коррекции измерений ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-026.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** ГНСС, спутниковая геодезическая аппаратура, модели ионосферы, ионосферная коррекция измерений, модель Клубучара, NeQuick-G, IRI, полное электронное содержание

**АННОТАЦИЯ** В данной работе представлены результаты сравнительного анализа эффективности моделей ионосферной коррекции измерений глобальных навигационных спутниковых систем, таких как модель Клубучара, NeQuick-G и IRI-2016. Исследование направлено на оценку точности этих моделей в различных географических регионах, включая территорию Российской Федерации, с учетом особенностей ионосферной активности. Особое внимание уделено методикам вычисления вертикального полного электронного содержания (*англ.* Vertical Total Electron Content, VTEC) и использованию глобальных ионосферных карт (*англ.* Global Ionospheric Map, GIM) для верификации данных. Точность моделей оценивалась на основе среднеквадратической погрешности (СКП) разностей VTEC, рассчитанных по моделям и данным GIM. Проведенный анализ позволил выявить систематические смещения прогнозов и определить наиболее точные модели для различных условий ионосферы. Установлено, что модель NeQuick-G демонстрирует высокую эффективность в условиях спокойной ионосферы, обеспечивая минимальные значения СКП. В то же время модель IRI-2016 показала лучшие результаты при возмущенных состояниях ионосферы, что делает ее предпочтительной для использования в периоды повышенной солнечной активности. Исследование также выявило значительную вариативность точности моделей на территории РФ, что подчеркивает необходимость создания региональных и локальных моделей для достижения наилучших результатов. Полученные данные хорошо соотносятся с другими исследованиями, подтверждая надежность результатов.

# 1 Введение

Радионавигационные сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), проходя через ионосферу Земли, изменяют скорость своего распространения вследствие дифракции. Из-за этого возникают погрешности измерения псевдодальностей, приводящие в конечном счете к увеличению погрешностей определения координат.

Для повышения точности геодезических работ, выполняемых с использованием спутниковой геодезической аппаратуры, в измерения по сигналам ГНСС вносят поправки за влияние ионосферы. Поправки рассчитываются при помощи выбранной модели ионосферы либо по разности псевдодальностей, измеренных на двух разных частотах.

Основными моделями, применяемыми для ионосферной коррекции измерений ГНСС, являются модель Клобучара, NeQuick-G, IRI и глобальные ионосферные карты (*англ.* Global Ionospheric Map, GIM). Из них первые три могут применяться в режиме, близком к реальному времени. Параметры модели Клобучара транслируются в навигационном сообщении GPS, а для модели NeQuick-G — в навигационном сообщении Galileo. Модель IRI может выполнять моделирование по средним значениям ионосферных индексов за предыдущий период времени. Глобальные ионосферные карты формируются по результатам постобработки измерений на постоянно действующих станциях наблюдения ГНСС и доступны через 24 часа (быстрое решение) или 11 дней (финальное решение)<sup>1</sup>.

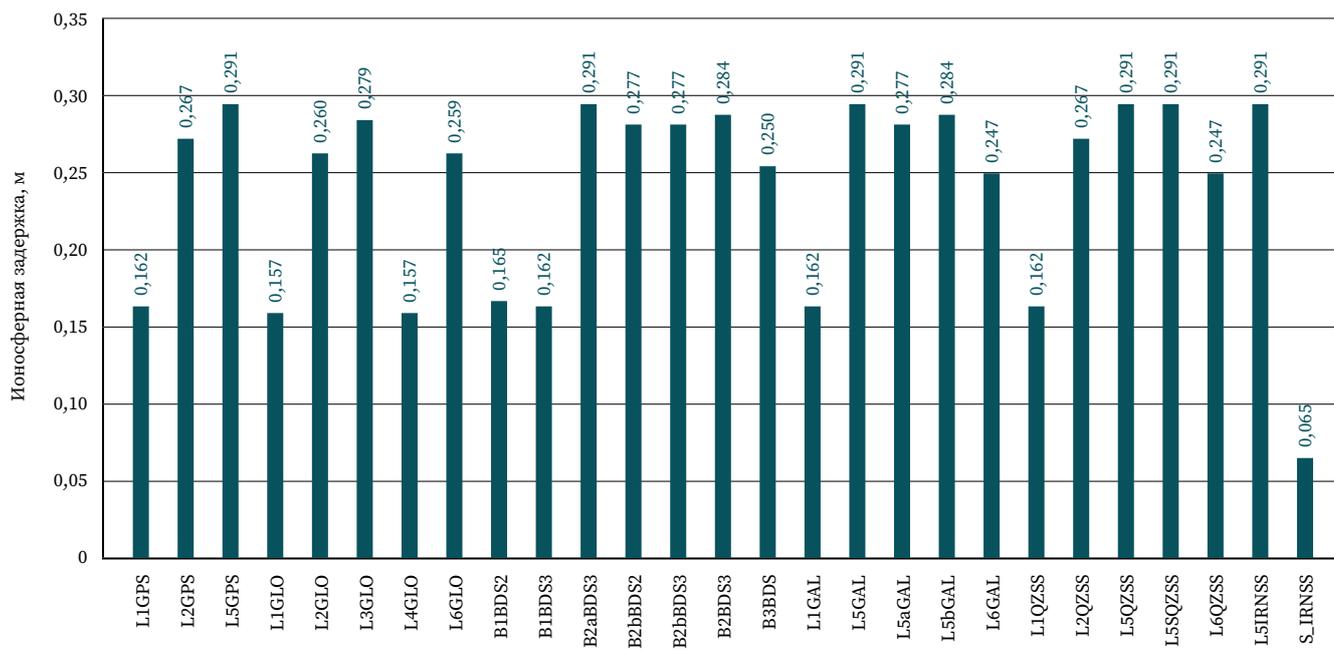
Поскольку величина ионосферной задержки сигнала зависит от частоты, непосредственно моделируемым параметром является полное электронное содержание (*англ.* Total Electron Content, TEC) ионосферы, которое связано с ионосферной погрешностью кодовых псевдодальностей следующим соотношением [1]:

$$I = \frac{40,308TEC}{f^2},$$

где  $I$  — ионосферная задержка, м;  
 $f$  — несущая частота радионавигационного сигнала, Гц.

Значения погрешностей, соответствующих  $TEC = 1TECU$ , приведены на рис. 1.

**Рис. 1**  Ионосферная задержка сигнала при  $TEC = 1TECU$   
**Fig. 1** Ionospheric signal delay at  $TEC = 1TECU$



<sup>1</sup> Ionospheric Products / International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://igs.org/products/#ionosphere> (дата обращения: 25.01.2025).

Сведения о точности получаемых при помощи модели поправок предоставляются только глобальные ионосферные карты, в которых присутствуют оценки среднеквадратической погрешности (СКП) для каждого значения TEC, заданного в узле регулярной сетки. Для современных GIM значения СКП варьируются от 1 до 10 TECU и в среднем составляют 1,523 TECU для рассматриваемого в исследовании периода. Для моделей, доступных в режиме, близком к реальному времени, существуют только апостериорные оценки их точности, полученные в ходе отдельных исследований [2–8]. Такие исследования могут относиться к конкретным станциям [3–6], регионам [7], периодам аномальной солнечной или геомагнитной активности [8]. Это затрудняет выбор модели для использования в конкретных условиях, их совместное применение и назначение весов измерений после внесения в них поправок за ионосферную задержку. В связи с этим актуальными представляются оценка точности и сравнительный анализ моделей ионосферы, используемых для ионосферной коррекции наблюдений ГНСС в режиме, близком к реальному времени. Целью данного исследования является оценка точности вычисления поправок за ионосферную задержку по моделям Клобучара, NeQuick-G и IRI. Оценка выполняется отдельно для всей поверхности Земли, полярных, среднеширотных, экваториальной областей и территории РФ. Полученные результаты позволяют оптимизировать выбор модели для ионосферной коррекции измерений и производить назначение весов измерений с учетом сведений о точности используемого метода ионосферной коррекции.

## 2 Методика исследования

### 2.1 Используемые модели ионосферы

Модель Клобучара — это официальный алгоритм ионосферной коррекции, принятый системой GPS. Для вычисления вертикального полного электронного содержания (*англ.* Vertical Total Electron Content, VTEC) по модели Клобучара используются алгоритм, изложенный в интерфейсно-контрольном документе GPS<sup>2</sup>, и некоторые пояснения к нему, приведенные в оригинальной публикации<sup>3</sup>. Параметры модели ( $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ) выбираются из навигационного файла GPS в формате RINEX на соответствующую дату.

Модель NeQuick-G — это официальный алгоритм ионосферной коррекции, принятый системой Galileo [9] и являющийся оптимизированной версией модели NeQuick [10]. Для вычисления VTEC по модели NeQuick-G<sup>4</sup> используется ее эталонная реализация в виде программы NeQuickG\_JRC.exe на языке программирования C. Параметры модели ( $a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}$ ), используемые для расчета эффективного уровня ионизации  $A_z$ , выбираются из навигационного файла Galileo в формате RINEX на соответствующую дату.

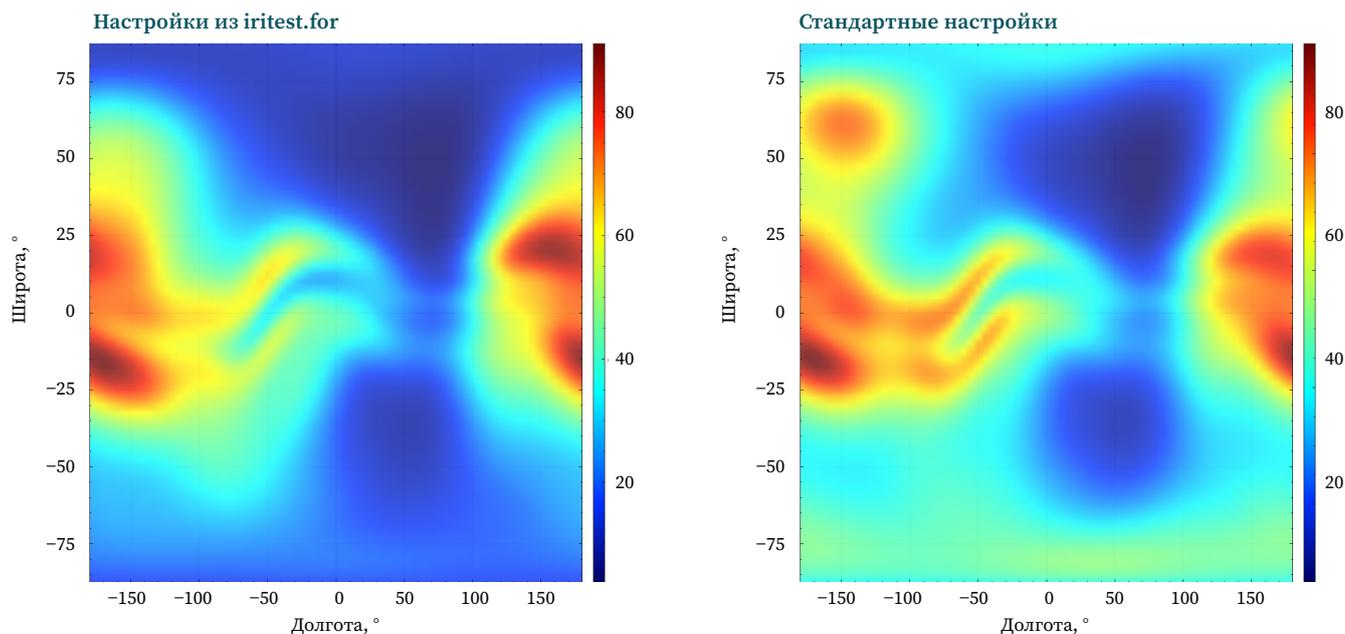
Для вычисления VTEC по модели IRI выбрана версия модели IRI-2016 [11] как наиболее распространенная на текущий момент. В частности, используется ее эталонная реализация в виде программы на языке программирования Fortran `iritest.for`<sup>5</sup>, доработанная авторами для проведения необходимых

2 IS-GPS-200. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kaf401.rloc.ru/files/icd200d.pdf> (дата обращения: 25.01.2025).

3 Klobuchar J.A. A first-order, worldwide, ionospheric, time-delay algorithm // Air Force Surveys in Geophysics. 1975. No. 324. P. 1–24.

4 European GNSS (Galileo) Open Service. Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo\\_Ionospheric\\_Model.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf) (дата обращения: 16.11.2024).

5 Index of IRI-2016 / International reference ionosphere. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iramodel.org/IRI-2016/> (дата обращения: 25.01.2025).



**Рис. 2** Тепловая карта VTEC, полученная при стандартных настройках и при настройках из iritest.for

**Fig. 2** VTEC heat map obtained with standard settings and with settings from iritest.for

вычислений. Рассматривались два варианта настройки параметров программы: представленные в IRI-Switches-options как стандартные параметры, используемые по умолчанию в программе iritest.for. Результаты вычисления VTEC с разными настройками существенно различаются, тепловые карты VTEC, полученные с обоими вариантами настроек, представлены на рис. 2.

Результаты, полученные при стандартных настройках, сильно смещены (на 10–20 TECU) относительно остальных моделей, при использовании параметров из iritest.for такого не наблюдается. В связи с этим в данном исследовании применяются параметры, принятые в iritest.for.

## 2.2 Методика оценки точности

В качестве критерия эффективности модели будем использовать СКП VTEC в рамках региона, которое вычислено на одну эпоху по разностям значений, полученных из исследуемой модели и по глобальной ионосферной карте с учетом ее погрешностей. Для оценки точности выбраны 12 суток в течение 2023 года, а именно первые сутки каждого месяца. Данные выбраны на предыдущий год относительно момента проведения исследования как наиболее актуальные, а конкретные даты определены для обеспечения равномерного покрытия диапазона внешних условий и оптимизации объемов вычислений.

В качестве характеристики точности модели используется СКП разности VTEC, вычисленного по оцениваемой модели, и VTEC, вычисленного по глобальной ионосферной карте:

$$2 \quad \Delta VTEC = VTEC_{MOD} - VTEC_{GIM},$$

где  $VTEC_{MOD}$  — вертикальное полное электронное содержание, вычисленное при помощи исследуемой модели;

$VTEC_{GIM}$  — вертикальное полное электронное содержание, вычисленное по GIM.

Для вычисления СКП используются значения VTEC, полученные в узлах регулярной сетки на заданный момент времени. Применяется формула Бесселя:

$$3 \quad m_{\Delta VTEC} = \sqrt{\frac{\sum \Delta VTEC^2}{n-1}},$$

где  $n$  — число значений  $\Delta VTEC$ , используемых для вычисления.

Параметры используемой регулярной сетки аналогичны параметрам GIM в формате IONEX, формируемым IGS, а именно:

- границы по широте от 87,5° до -87,5°;
- границы по долготе от -180° до +180°;
- шаг по широте 2,5°;
- шаг по долготе 5,0°.

Поскольку значения выбираются непосредственно из узлов регулярной сетки, они не отягощены дополнительными погрешностями интерполяции.

Вычисления производятся для каждого рассматриваемых суток на моменты времени начиная с 0:00 с интервалом в 2 часа (всего 13 эпох для каждого суток). Это также соответствует интервалам, используемым GIM, и позволяет не отягощать результат погрешностями интерполяции по времени.

Вычисления производятся отдельно для следующих регионов:

- вся поверхность Земли (в границах регулярной сетки, указанных выше);
- полярные области ( $|B| > 66,562^\circ$ );
- среднеширотные области ( $23,43722^\circ < |B| < 66,562^\circ$ );
- экваториальная область ( $|B| < 23,43722^\circ$ );
- территория РФ ( $41,1833^\circ < B < 81,8500^\circ$ ,  $L > 19,6333^\circ$  или  $-180^\circ < L < -169,0000^\circ$ ).

Перейти по СКП разностей непосредственно к СКП вычисления VTEC по модели можно, используя следующее соотношение, полученное для функции (2) при помощи формулы СКП функции общего вида:

$$4 \quad m_{VTEC} = \sqrt{m_{\Delta VTEC}^2 - m_{\Delta VTEC\_GIM}^2}$$

где  $m_{VTEC}$  — СКП вычисления VTEC при помощи исследуемой модели;  $m_{\Delta VTEC\_GIM}$  — СКП вычисления VTEC при помощи исследуемой GIM.

Следует отметить, что формула (4) может привести к вычислительной ошибке (извлечение корня из отрицательного числа), вследствие чего для ее практического применения предпочтительна ситуация, когда  $m_{VTEC} > m_{VTEC\_GIM}$ . В настоящем исследовании  $m_{VTEC}$  как минимум в два раза больше, чем  $m_{VTEC\_GIM}$ , и, следовательно, такой проблемы не ожидается.

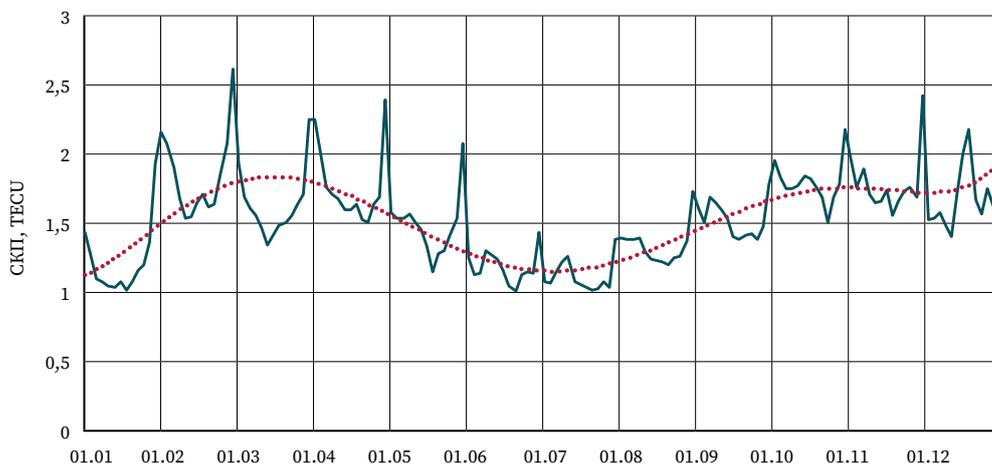
В качестве значения  $m_{VTEC\_GIM}$  используется осредненное по всем использованным узлам среднее квадратическое отклонение VTEC, приведенное в GIM. График вычисленных средних значений  $m_{VTEC\_GIM}$  на рассматриваемые эпохи приведен на рис. 3. Далее при анализе результатов будем рассматривать как  $m_{\Delta VTEC}$ , так и  $m_{VTEC}$ .

На рис. 3 наблюдается явная суточная динамика. Максимальные значения  $m_{VTEC\_GIM}$  соответствуют моментам начала и конца суток, а минимальные — середине суток. Это обусловлено использованием при получении GIM суточных файлов наблюдений ГНСС, вследствие чего для первой и последней эпох используется меньший объем измерений, чем для остальных.

Для практической реализации представленной методики использовано специальное программное обеспечение, разработанное авторами на языке программирования C++ с применением фреймворка QT. Кроме выполнения необходимых расчетов программное обеспечение позволяет визуализировать данные в виде тепловых карт.

**Рис. 3** Средние значения  $m_{VTEC\_GIM}$  на рассматриваемые эпохи

**Fig. 3** Average values  $m_{VTEC\_GIM}$  for the considered epochs



**Условные обозначения**  
 — СКП GIM  
 ..... Полиномиальная (СКП GIM)

**Рис. 4** 

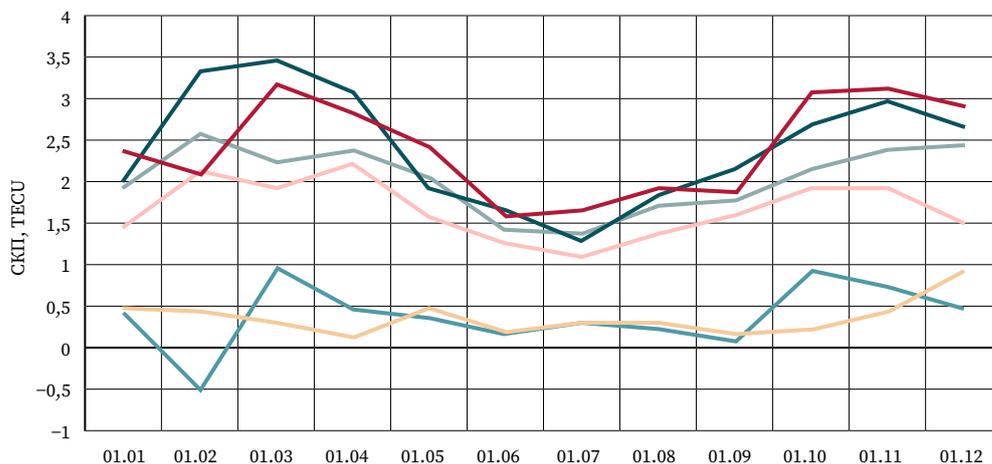
Значения  $m_{VTEC\_GIM}$  из файла GIM и оцененные по общим эпохам

**Fig. 4**

$m_{VTEC\_GIM}$  values from the GIM file and estimated by common epochs

**Условные обозначения**

- 0:00 – GIM
- 24:00 – GIM
- 0:00 – Оценка
- 24:00 – Оценка
- 0:00 – Δ
- 24:00 – Δ



### 2.3 Верификация данных GIM

Каждая глобальная ионосферная карта составляется на одни сутки с интервалом по времени, равным двум часам. Карта содержит 13 эпох. Это означает, что в ней имеются данные на 0:00 текущих суток и 0:00 следующих суток. Таким образом, каждая GIM содержит две повторяющихся эпохи: первую и последнюю. Каждая GIM составляется с использованием наблюдений на постоянно действующих станциях ГНСС продолжительностью одни сутки, обработка соседних суток производится независимо, таким образом, полученные результаты обработки (GIM) также являются независимыми.

Выполнив сравнение данных на общую эпоху GIM, можно оценить  $m_{\Delta VTEC}$  по формуле (3). В то же время  $m_{\Delta VTEC}$  можно вычислить, преобразовав формулу (4) и используя осредненные значения  $m_{VTEC\_GIM}$ , полученные из GIM на данную эпоху. Сравнив полученные двумя способами значения, можно сделать выводы о надежности данных о  $m_{VTEC\_GIM}$ , приведенных в GIM, и корректности их использования для вычислений по формуле (4).

Выполним расчеты для каждой применяемой в исследовании GIM (12 карт) для начальной и конечной эпох (24 значения), используя GIM на соседние даты (дополнительно использовано 24 файла GIM). Для каждого из исходных 12 файлов выполнялась оценка точности на эпоху 0:00 и 24:00. На рис. 4 приведены оцененные таким способом  $m_{VTEC\_GIM}$ , средние значения  $m_{VTEC\_GIM}$  из файла IONEX и разности между ними.

Оцененные значения в среднем на 0,379 TECU, или на 21 %, больше, чем представленные в файле IONEX. При этом динамика изменения  $m_{VTEC\_GIM}$  в течение года одинакова для всех рассматриваемых рядов. Исходя из этого, можно заключить, что оценки точности GIM несколько занижены, но в общем репрезентативны.

## 3 Результаты

По результатам выполненных вычислений получены  $m_{\Delta VTEC}$  на 156 эпох по каждому рассматриваемому региону. Результаты представлены на рис. 5–7 для модели Клубучара, NeQuick-G и IRI-2016 соответственно.

Средние значения  $m_{\Delta VTEC}$  за все рассматриваемые эпохи для всех регионов по каждой модели приведены на рис. 8. Аналогичные данные о  $m_{VTEC}$ , вычисленные по формуле (4), представлены на рис. 8. При вычислении использовалось наиболее консервативное значение  $m_{VTEC\_GIM} = 2,4$  TECU, а именно среднее значение, полученное в ходе оценки по общим эпохам. При таком расчете расхождение между  $m_{\Delta VTEC}$  и  $m_{VTEC}$  не превышает 20 % (для территории РФ

и полярных регионов). Если использовать среднее значение  $m_{VTEC\_GIM}$  непосредственно из файла IONEX, равное 1,5 TECU, то расхождение между  $m_{\Delta VTEC}$  и  $m_{VTEC}$  не превышает 7 %.

Вычисленные средние значения  $\Delta VTEC$  (систематические смещения прогноза) приведены на рис. 9. Наименее смещенный прогноз получен для IRI-2016, а наиболее смещенные модели Клубучара.

**Рис. 5** ➤

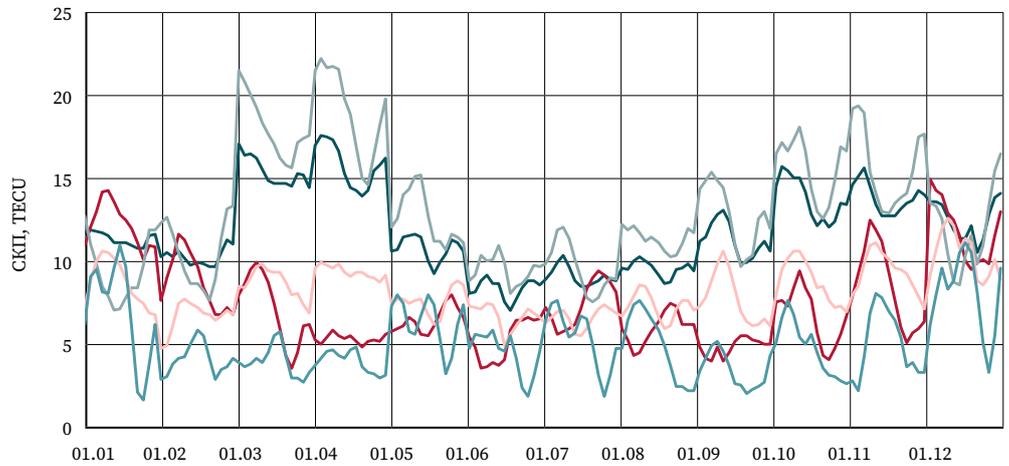
Графики  $m_{\Delta VTEC}$  для модели Клубучара

**Fig. 5**

$m_{\Delta VTEC}$  graphs for the Klobuchar model

**Условные обозначения**

- Вся поверхность
- Полярные регионы
- Тропический регион
- Среднеширотные регионы
- Территория РФ



**Рис. 6** ➤

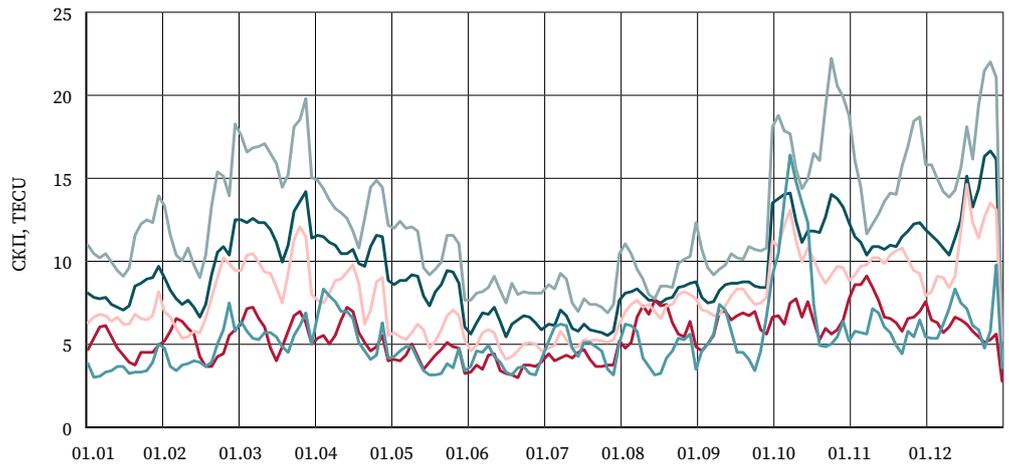
Графики  $m_{\Delta VTEC}$  для модели NeQuick-G

**Fig. 6**

$m_{\Delta VTEC}$  graphs for the NeQuick-G model

**Условные обозначения**

- Вся поверхность
- Полярные регионы
- Тропический регион
- Среднеширотные регионы
- Территория РФ



**Рис. 7** ➤

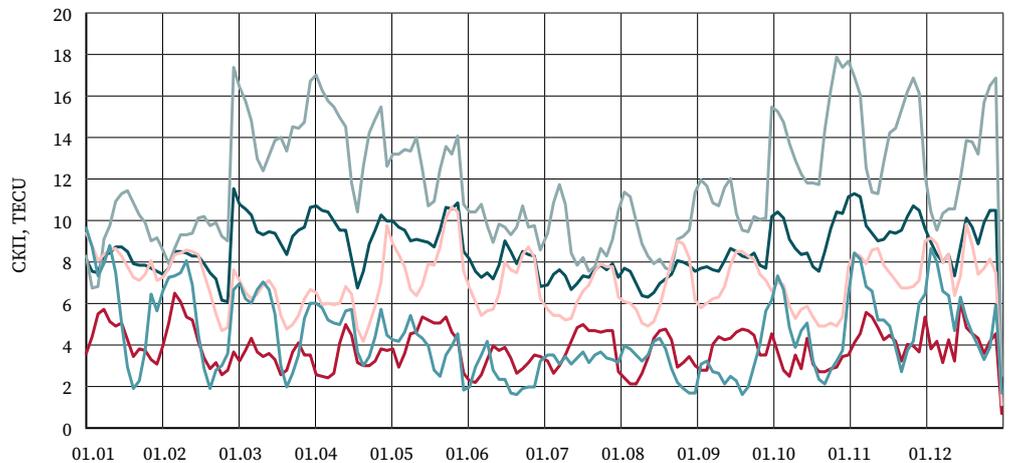
Графики  $m_{\Delta VTEC}$  для модели IRI-2016

**Fig. 7**

$m_{\Delta VTEC}$  graphs for the IRI-2016 model

**Условные обозначения**

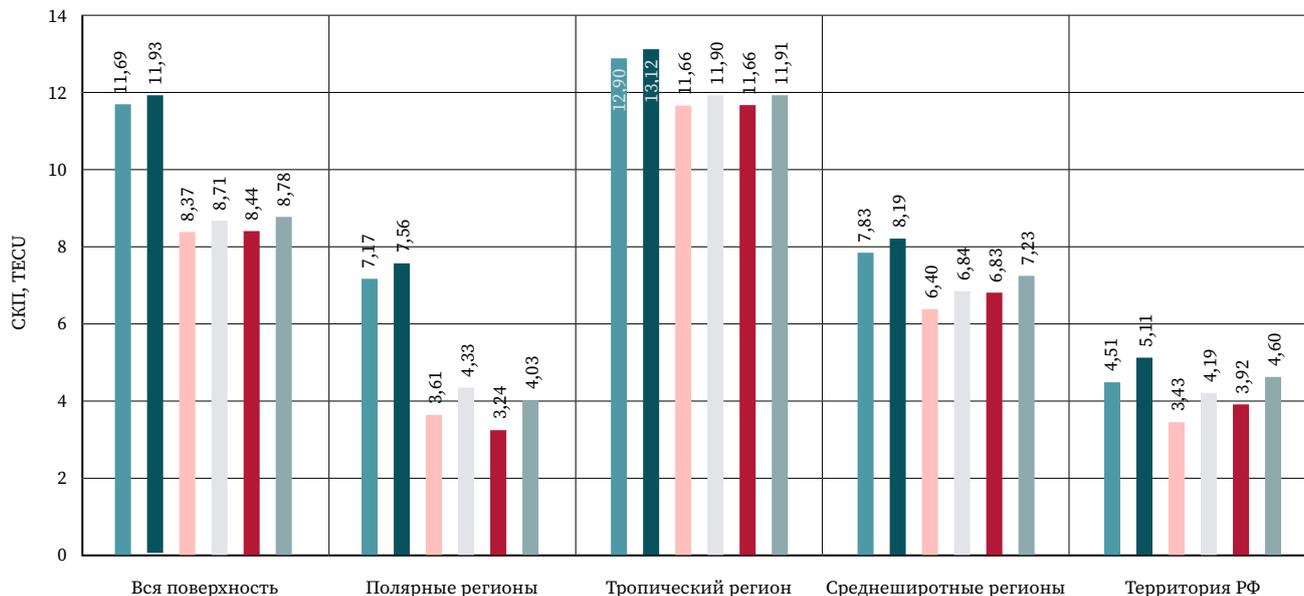
- Вся поверхность
- Полярные регионы
- Тропический регион
- Среднеширотные регионы
- Территория РФ



**Рис. 8**   
Средние значения  $m_{\Delta VTEC}$  и  $m_{VTEC}$

**Fig. 8**  
Average values of  $m_{\Delta VTEC}$  and  $m_{VTEC}$

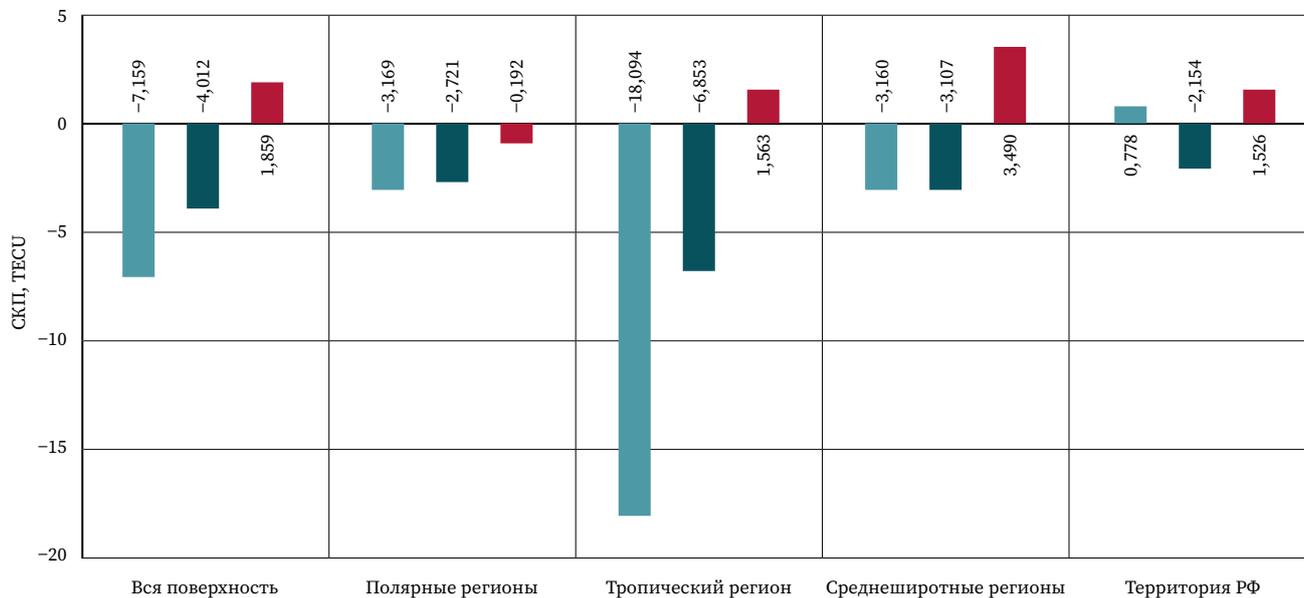
**Условные обозначения**  
  $m_{VTEC}$ (Кло)      $m_{\Delta VTEC}$ (NeQ)  
  $m_{\Delta VTEC}$ (Кло)      $m_{VTEC}$ (IRI)  
  $m_{VTEC}$ (NeQ)      $m_{\Delta VTEC}$ (IRI)



**Рис. 9**   
Средние значения  $\Delta VTEC$

**Fig. 9**  
Average  $\Delta VTEC$  values

**Условные обозначения**  
 Клобучар  
 NeQuick-G  
 IRI-2016



Следует отметить, что для территории РФ получены значения, сопоставимые с полярными регионами, так как этот регион был единственным ограниченным по долготе и, соответственно, часть значений  $m_{VTEC}$  получена в условиях, когда все узлы (или большая их часть) находятся в неосвещенной части поверхности Земли. Если исключить из анализа периоды времени с 14:00 до 22:00 по UTC, то  $m_{\Delta VTEC}$  будут равны 5,784 для модели Клобучара, 4,702 — для NeQuick-G и 5,335 — для IRI-2016. Это лучше соответствует ожидаемым средним показателям между среднеширотными и полярными регионами.

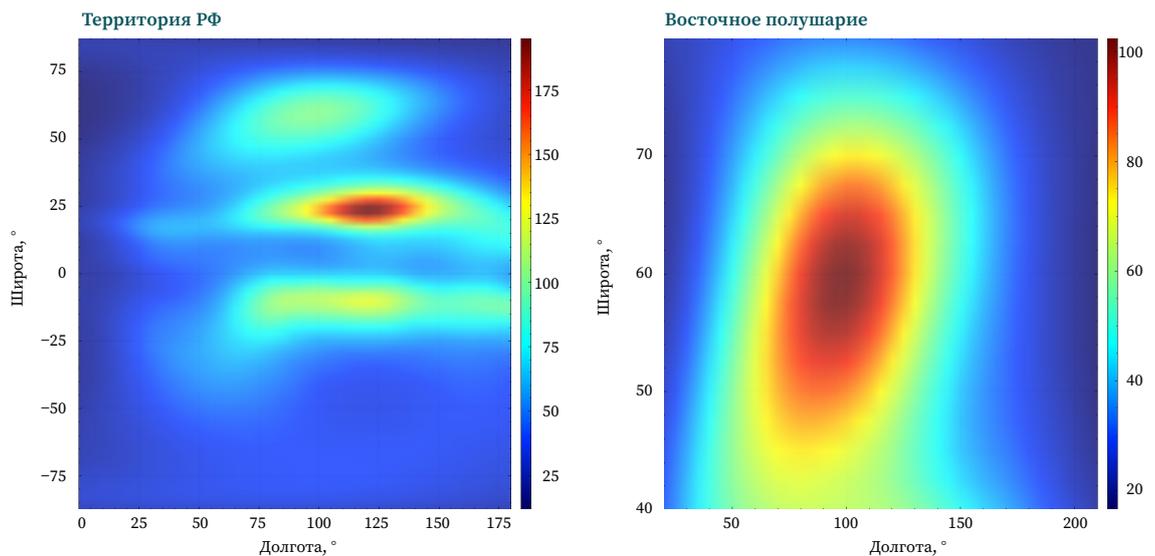
## 4 Обсуждение

Для всех моделей наблюдается суточная цикличность изменения  $m_{\Delta VTEC}$  при рассмотрении территории РФ. Поскольку этот регион ограничен по долготе, точность вычисления VTEC в ночное время лучше, чем в дневное. В такой ситуации более показательным является результат, выраженный в процентах от самого значения VTEC.

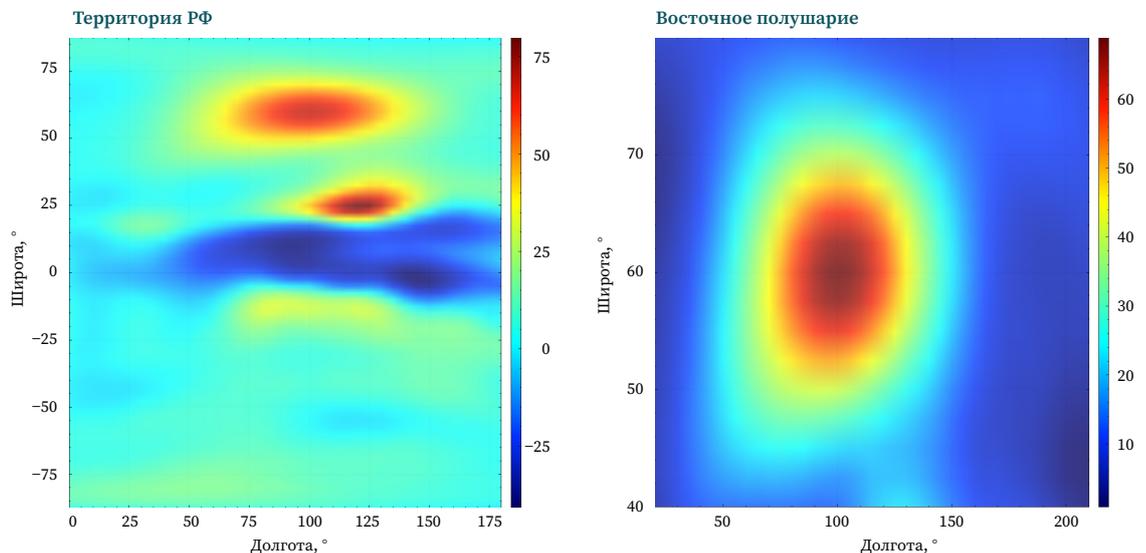
Несмотря на то что средние  $m_{\Delta VTEC}$  для NeQuick-G и IRI-2016 близки, при детальном рассмотрении результатов модели проявляют разные тенденции. NeQuick-G для ряда суток позволила получить  $m_{\Delta VTEC}$  менее 2 TECU на территории РФ, что сопоставимо с точностью GIM. При этом для других суток СКП превышало 20 TECU. Модель IRI-2016 при этом позволила получить данные с СКП не менее чем 4 TECU, но и максимальное значение не превышает 8–10 TECU. На рис. 10 приведена тепловая карта VTEC на эпоху 01.10.23 6:00 (UTC) с наибольшим значением  $m_{\Delta VTEC}$  для NeQuick-G. В частности, отчетливо видно возмущение в области средних широт, приводящее к появлению столь высокого СКП. Рассмотрев тепловую карту разностей NeQuick-G и GIM на эту эпоху, представленную на рис. 11, можно сделать вывод, что данный эффект является неточностью работы модели, а не реальным явлением.

Полученные данные в части сопоставимых значений СКП для NeQuick-G и IRI-2016 хорошо соотносятся с другими исследованиями, в частности 3,5 и 3,2 TECU в работе [4].

**Рис. 10**  Тепловые карты VTEC, полученные по модели NeQuick-G для восточного полушария и для территории РФ



**Рис. 11**  Тепловые карты разностей VTEC, полученные по модели NeQuick-G и GIM для восточного полушария и для территории РФ

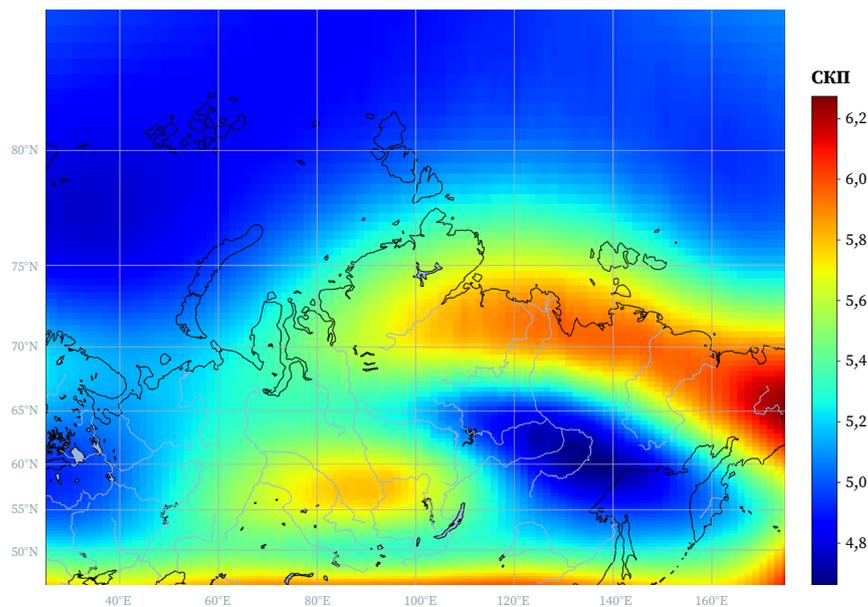


**Рис. 12**

Картограмма пространственного распределения  $m_{\Delta VTEC}$  для NeQuick-G на территории РФ

**Fig. 12**

Cartogram of the spatial distribution of  $m_{\Delta VTEC}$  for NeQuick-G in the territory of the Russian Federation



Результаты опираются на ограниченную выборку периодов времени в течение года. Чтобы удостовериться, что это не оказало существенного влияния на качество результатов, и для получения более детальных по точности моделей на территории РФ были выполнены дополнительные вычисления для модели NeQuick-G. Для этих вычислений использованы данные о TЕС, полученных по моделям NeQuick-G и GIM, на весь 2023 год с интервалом по времени 15 мин. на сетке с шагом в  $5,0^\circ$  по широте и долготе. Расчеты были выполнены в соответствии с приведенной выше методикой как для всего набора данных (9 776 160 значений  $\Delta VTEC$ ), так и для каждого отдельного узла (35 040 значений  $\Delta VTEC$ ).

На рис. 12 представлена картограмма распределения  $m_{\Delta VTEC}$ , полученная для сетки с шагом в  $5,0^\circ$  по широте и долготе.

Для рассматриваемого региона  $m_{\Delta VTEC}$  варьируется в пределах от 4,7 до 6,3 TECU, а  $m_{VTEC}$ , вычисленная по всем данным выборки, составила 5,3 TECU. На картограмме явно просматривается пространственное распределение  $m_{\Delta VTEC}$ , что свидетельствует о наличии зависимости величины погрешностей модели от пространственного положения точки. Наибольшие значения СКП соответствуют южной границе региона и северо-восточной его части. Полученное по всей выборке значение  $m_{\Delta VTEC}$  на 1,1 TECU выше, чем полученное ранее по ограниченной выборке. Это может быть обусловлено многими факторами, в частности дополнительными погрешностями, возникающими при интерполяции данных GIM по времени (для интервала в 15 мин.), использованием большего шага по широте и потенциальным наличием суток с большими расхождениями (выбросами) между NeQuick-G и GIM (аналогично наблюдаемому 01.10.2023). При этом расхождение примерно в 20 % между оценками, полученными по разному объему входных данных, позволяют составить более качественные представления о вариативности  $m_{\Delta VTEC}$  и репрезентативности данных.

## 5 Выводы

По результатам проведенного исследования получены оценки точности ( $m_{\Delta VTEC}$  и  $m_{VTEC}$ ) для моделей Клобушара, NeQuick-G, IRI-2016 по пяти рассматриваемым регионам. Исходя из результатов оценки и других данных, выявленных в процессе исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Модель Клобушара имеет точность в среднем на 27 % ниже, чем NeQuick-G или IRI-2016 (для всей поверхности). Наихудшим образом модель

проявляет себя в полярных регионах, где ее точность ниже на 45 %, а наилучшим — в экваториальном, где ее точность ниже на 9 %.

2. Модели NeQuick-G и IRI-2016 имеют практически одинаковые  $m_{\Delta VTEC}$  и  $m_{VTEC}$  для всех рассматриваемых регионов. При этом IRI-2016 позволяет получить более предсказуемый результат, а NeQuick-G — более точный результат в отдельных случаях. Если рассматривать в качестве характеристики стабильности результата СКП от мгновенных значений  $m_{\Delta VTEC}$  по всей поверхности, то для NeQuick-G получим 2,75 TECU, а для IRI-2016 — 1,21 TECU.
3. Наибольшие СКП для всех моделей относятся к экваториальному региону, а наименьшие — к полярным регионам. Для территории РФ получены промежуточные значения между среднеширотными и полярными регионами. Тенденция наблюдается для всех трех рассматриваемых моделей.
4. Наилучшими из рассмотренных моделей для ионосферной коррекции наблюдений ГНСС на территории РФ являются NeQuick-G (для периодов со спокойным состоянием ионосферы) и IRI-2016 (для периодов с возмущенным состоянием ионосферы).
5. Для территории Российской Федерации, которая включает как среднеширотные, так и полярные регионы, наблюдается значительная вариативность точности моделей. Это подчеркивает необходимость создания региональных и локальных моделей для достижения наилучших результатов на территории РФ.

В ходе дальнейших исследований планируется:

- 1) рассмотреть более широкий перечень моделей ионосферы, в частности IRI-Plas 2017, IRI-2020, BDGIM [12, 13], GEMTEC [14], модель ионосферы ГЛОНАСС (параметры для которой транслируются в навигационном сообщении сигнала L3) и др.;
- 2) провести анализ с использованием большего объема данных на более длительные периоды времени;
- 3) оценить точность при комбинировании данных нескольких моделей;
- 4) сравнить эффективность моделей непосредственно для повышения точности позиционирования.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картгеоцентр, 2005. Т. 1. 334 с.
2. Yasyukevich Y., Zatolokin D., Yasyukevich A., et al. Ionosphere Models Validation: TEC and Positioning Domain // AGU Fall Meeting Abstracts. New Orleans LA, 2021. P. SA44B-09.
3. Nibigira J. de D., Ratnam D.V., Sivakrishna K. Performance Analysis of NeQuick-G, IRI-2016, IRI-Plas 2017 and AfriTEC Models over the African Region during the Geomagnetic Storm of March 2015 // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. Vol. 63. P. 83–98. DOI:10.1134/s0016793223600601.
4. Yasyukevich Y.V., Zatolokin D., Padokhin A., et al. Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains // Sensors. 2023. Vol. 23. No. 10. P. 4773. DOI:10.3390/s23104773.
5. Tian Y., Li S., Shen H., et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models // Astrophysics and Space Science. 2022. Vol. 367. No. 8. P. 78. DOI:10.1007/s10509-022-04109-7.
6. Gatica-Acevedo V.J., Sergeeva M.A., Maltseva O.A., et al. TEC variations and IRI-2016, IRI-2020 and IRI-Plas performance in Mexico // Advances in Space Research. 2025. Vol. 75. No. 5. P. 4260–4273. DOI:10.1016/j.asr.2024.03.046.
7. Liu J., Jia X., Zhu Y., et al. Comparing GNSS TEC data from the African continent with IRI-2016, IRI-Plas, and NeQuick predictions. Advances in Space Research // Advances in Space Research. 2022. Vol. 69. No. 7. P. 2852–2864. DOI:10.1016/j.asr.2022.01.008.
8. Atıcı R., Sağır S., Emelyanov L.Y., et al. Investigation of ionospheric electron density change during two partial solar eclipses and its comparison with predictions of NeQuick 2 and IRI-2016 Models // Wireless Personal Communications. 2021. Vol. 118. P. 2239–2251. DOI:10.1007/s11277-021-08122-x.

9. Aragon-Angel A., Zürn M., Rovira-Garcia A. Galileo ionospheric correction algorithm: An optimization study of NeQuick-G // Radio science. 2019. Vol. 54. No. 11. P. 1156–1169. DOI:10.1029/2019RS006875.
10. Montenbruck O., González Rodríguez B. NeQuick-G performance assessment for space applications // GPS solutions. 2020. Vol. 24. P. 13. DOI:10.1007/s10291-019-0931-2.
11. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. Huang International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. No. 15. P. 418–429. DOI:10.1002/2016SW001593.
12. Yuan Y., Wang N., Li Z., et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results // Navigation. 2019. Vol. 66. No. 1. P. 55–69. DOI:10.1002/navi.292.
13. Zhu Y., Tan S., Zhang Q., et al. Accuracy evaluation of the latest BDGIM for BDS-3 satellites // Advances in space research. 2019. Vol. 64. No. 6. P. 1217–1224. DOI:10.1016/j.asr.2019.06.021.
14. Ivanov V.B., Gorbachev O.A., Kholmogorov A.A., et al. Optimization and testing of the GEMTEC model of total electron content in the ionosphere // Cosmic Research. 2015. Vol. 53. P. 267–271. DOI:10.1134/S0010952515040036.

**АВТОРЫ** **Куприянов Андрей Олегович**

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

**Морозов Дмитрий Андреевич**

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

**Замогильный Дмитрий**

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

Поступила 08.02.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Assessment of the effectiveness of models used for ionospheric correction of GNSS measurements

Andrey O. Kupriyanov<sup>1</sup>✉, Dmitry A. Morozov<sup>1</sup>, Dmitry Zamogilny<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
✉ gnss@miigaik.ru

**CITATION** Kupriyanov AO, Morozov DA, Zamogilny D. Assessment of the effectiveness of models used for ionospheric correction of GNSS measurements. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-026.

**KEYWORDS** GNSS, GNSS receiver, ionospheric models, ionospheric measurement correction, Klobuchar model, NeQuick-G, IRI, total electron content

**ABSTRACT** Global navigation satellite systems (GNSS) are significantly affected by ionospheric delays, which impact on the accuracy of coordinate determination. In this study, the performance of three ionospheric correction models was evaluated: Klobuchar, NeQuick-G, and IRI-2016 – in various geographic regions, including the territory of the Russian Federation. The research is based on data from the first day of each month in 2023, using vertical total electron content (VTEC) values calculated at regular grid points with a 2.5° latitude and 5.0° longitude step. The accuracy of these models is assessed using the root mean square (RMS) of the difference in VTEC calculated by the models and global ionospheric maps (GIM). The analysis covers the entire Earth's surface, polar regions, mid-latitude regions, equatorial regions, and the territory of the Russian Federation. The Klobuchar model demonstrates the lowest accuracy, particularly in polar regions, where its accuracy values do not exceed 45 % and lower than that of the other models. In equatorial regions, its accuracy is only 9 % lower. The NeQuick-G and IRI-2016 models show similar overall accuracy, but NeQuick-G provides more accurate results in specific cases, with RMS values as low as 2 TECU, while IRI-2016 offers more predictable results with RMS values not exceeding 8–10 TECU. For the territory of the Russian Federation, the NeQuick-G model is most effective during calm ionospheric periods, with an RMS of 4.702 TECU, and the IRI-2016 model is preferred during disturbed conditions, with an RMS of 5.335 TECU.

**REFERENCES** 1. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: Kartgeocenter; 2005. 334 p. (In Russian).

2. Yasyukevich Y, Zatolokin D, Yasyukevich A, et al. Ionosphere Models Validation: TEC and Positioning Domain. *AGU Fall Meeting Abstracts*. New Orleans LA; 2021: SA44B-09.
3. Nibigira JdeD, Ratnam DV, Sivakrishna K. Performance Analysis of NeQuick-G, IRI-2016, IRI-Plas 2017 and AfriTEC Models over the African Region during the Geomagnetic Storm of March 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023;63: 83–98. DOI:10.1134/s0016793223600601.
4. Yasyukevich YV, Zatolokin D, Padokhin A, et al. Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains. *Sensors*. 2023;23(10): 4773. DOI:10.3390/s23104773.
5. Tian Y, Li S, Shen H, et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models. *Astrophysics and Space Science*. 2022;367(8): 78. DOI:10.1007/s10509-022-04109-7.
6. Gatica-Acevedo VJ, Sergeeva MA, Maltseva OA, et al. TEC variations and IRI-2016, IRI-2020 and IRI-Plas performance in Mexico. *Advances in Space Research*. 2025;75(5): 4260–4273. DOI:10.1016/j.asr.2024.03.046.
7. Liu J, Jia X, Zhu Y, et al. Comparing GNSS TEC data from the African continent with IRI-2016, IRI-Plas, and NeQuick predictions. *Advances in Space Research*. 2022;69(7): 2852–2864. DOI:10.1016/j.asr.2022.01.008.
8. Atıcı R, Sağır S, Emelyanov LY, et al. Investigation of Ionospheric Electron Density Change During Two Partial Solar Eclipses and Its Comparison with Predictions of NeQuick 2 and IRI-2016 Models. *Wireless Personal Communications*. 2021;118: 2239–2251. DOI:10.1007/s11277-021-08122-x.
9. Aragon-Angel A, Zürn M, Rovira-Garcia A. Galileo Ionospheric Correction Algorithm: An Optimization Study of NeQuick-G. *Radio Science*. 2019;54(11): 1156–1169. DOI:10.1029/2019RS006875.
10. Montenbruck O, González Rodríguez B. NeQuick-G performance assessment for space applications. *GPS Solutions*. 2020;24: 13. DOI:10.1007/s10291-019-0931-2.
11. Bilitza D, Altadill D, Truhlik V, et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017;15: 418–429. DOI:10.1002/2016SW001593.
12. Yuan Y, Wang N, Li Z, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results. *Navigation: journal of the Institute of Navigation*. 2019;66(1): 55–69. DOI:10.1002/navi.292.
13. Zhu Y, Tan S, Zhang Q, et al. Accuracy evaluation of the latest BDGIM for BDS-3 satellites. *Advances in Space Research*. 2019;64(6): 1217–1224. DOI:10.1016/j.asr.2019.06.021.
14. Ivanov VB, Gorbachev OA, Kholmogorov AA, et al. Optimization and testing of the GEMTEC model of total electron content in the ionosphere. *Cosmic Research*. 2015;53(4): 267–271. DOI:10.1134/S0010952515040036.

**AUTHORS****Andrey O. Kupriyanov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy  
 PhD in Engineering

 0009-0008-9222-5579

**Dmitry A. Morozov**

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

 0009-0002-1254-9095

**Dmitry Zamogilny**

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

 0009-0008-3242-1471

Submitted: February 08, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Исследование вопросов развития координатного обеспечения

И.В. Гусев<sup>1</sup>, А.М. Голубицкий<sup>1</sup>, В.Б. Непоклонов<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,  
Королёв, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,  
Москва, Россия

✉ vbnep@miigaik.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Гусев И.В., Голубицкий А.М., Непоклонов В.Б. Исследование вопросов развития координатного обеспечения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 22–43. DOI:10.30533/GiA-2025-049.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** космический геодезический комплекс, координатное обеспечение, геоцентрическая система координат, ГНСС, МСВЗ, GENESIS, GGOS, GGRF, ITRF, ITRS

**АННОТАЦИЯ** Целью работы является выявление перспективных направлений развития координатного обеспечения как основы устойчивого социально-экономического развития. С позиций системного анализа исследованы технологические аспекты установления, поддержания, развития и распространения общеземной геоцентрической системы координат (ОГСК). Рассмотрены различные реализации ОГСК, включая первичные реализации на базе сети ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame), альтернативные решения, полученные ведущими зарубежными центрами, реализации на базе станций Международной службы ГНСС и реализации на основе орбитального подхода. Проведенный анализ учитывал текущее состояние отечественной космической геодезии и ее использование в интересах координатного обеспечения. В качестве основных достижений отмечено, что в СССР и РФ за это время при помощи космических геодезических комплексов «Геоид» и «ГЕО-ИК» были созданы ОГСК «Параметры Земли 1977, 1985 и 1990 годов». На сегодняшний день перспективы развития ОГСК связаны с установлением качественно новой общеземной геодезической системы координат, включающей геометрическую и физическую отсчетные основы; запуском спутника GENESIS, который будет реализовывать принцип колокации нескольких типов измерений в космосе; достижением беспрецедентного миллиметрового уровня точности в определении координат и скоростей опорных пунктов, который задан в проекте GGOS.

# 1 Введение

Система координат служит основой для решения социально-экономических, научных и военных задач, а вопросы ее установления, поддержания и развития издавна являются предметом геодезической науки. Под системой координат понимают набор математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства<sup>1</sup>, а ее практической реализацией является геодезическая отсчетная основа, закрепляемая пунктами геодезической сети на земной поверхности с соответствующими значениями координат<sup>2</sup> и скоростей их годовых движений. Современные реализации систем координат включают также модели движения координат опорных пунктов, их временные ряды и параметры связи с другими системами.

Идеальная земная система координат (ЗСК) определяется как трехмерная в математическом смысле система координат, связанная с Землей и вращающаяся вместе с ней. В ньютоновском смысле физическое пространство рассматривается как евклидово аффинное трехмерное пространство, что предполагает выбор в качестве его модели аффинной системы координат [1]. Идеальная геоцентрическая ЗСК должна иметь свое начало в центре масс Земли, а ее главная плоскость должна совпадать с плоскостью земного экватора. Ось  $X$  направлена в нулевой (Гринвичский) меридиан, ось  $Z$  — в полюс Земли, ось  $Y$  дополняет систему до правой. Ее три ортогональные декартовы оси должны быть фиксированными в теле вращающейся Земли при условии отсутствия вращения системы координат в теле самой Земли (условие No-Net-Rotation), вызванного тектоникой литосферных плит, а масштаб должен быть согласован со всемирно принятыми мерами длины, установленными в соглашениях системы единиц СИ [1, 2].

Под координатным обеспечением понимается комплекс согласованных организационно-технических мероприятий, направленных на установление, поддержание, развитие и распространение заданной системы координат, а также определение параметров ее связи с другими системами. Координатное обеспечение, высотное и гравиметрическое образуют систему геодезического обеспечения страны [3]. Данную систему можно трактовать как «совокупность взаимодействующих технических, технологических и информационных компонентов для достижения определенных целей, связанных с удовлетворением потребностей различных органов управления, а также юридических и физических лиц с необходимыми для них геодезическими данными и продуктами их переработки в соответствии с установленными требованиями к составу, точности, полноте, подробности и актуальности данной системы» [4, с. 7–8].

Сегодня координатное обеспечение потребителей осуществляется как традиционными геодезическими методами измерений, так и с использованием глобальных (ГНСС) и региональных навигационных спутниковых систем (РНСС) (в настоящее время функционируют четыре ГНСС: GPS [США], ГЛОНАСС [РФ], Galileo [ЕС], BDS [КНР] — и две РНСС: QZSS [Япония] и NavIC [Индия]). В первом случае для определения координат используется геодезическая отсчетная основа, а во втором — бортовые эфемериды<sup>3</sup> навигационных космических аппаратов (НКА), передаваемые в составе навигационного сообщения.

При этом развитие координатного обеспечения нашей страны, важность которого обуславливается потребностями научного, социально-экономического и оборонного характера, сталкивается с необходимостью, с одной стороны, согласования государственных систем координат с общепринятой в качестве

1 ISO 19111-2019. Geographic information – Referencing by coordinates / International Organization for Standardization, 2019. 143 p.

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

3 ГОСТ Р 52928-2010. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 11 с.

эталона Международной земной системой координат (МЗСК), с другой — обеспечения независимости и самодостаточности государственных систем координат. Другим вопросом является эффективность доведения системы координат до потребителя, что требует достаточной плотности размещения опорных пунктов на территории страны, площадь которой составляет более 17 млн км<sup>2</sup>, в случае применения традиционных методов либо наличия высокоточных бортовых эфемерид НКА при использовании ГНСС. Все это требует развития качественной национальной геодезической инфраструктуры, которая является фундаментом системы геодезического обеспечения страны.

## 2 Материалы и методы

Суть данной работы заключается в системном анализе технологических аспектов установления, поддержания, развития и распространения общеземной геоцентрической системы координат (ОГСК) как основы устойчивого социально-экономического развития с целью выявления перспективных направлений развития координатного обеспечения как составной части системы геодезического обеспечения страны.

Поскольку общественно-экономические процессы становятся все более зависимыми от сложных технологий и управления пространством, в котором они осуществляются, за последние два десятилетия наблюдается значительный рост потребности в точном местопределении и качественных геопространственных данных. Это требует создания бесшовной картографической основы, развития навигационных технологий и внедрения единой координатной основы, что укладывается в концепцию создания единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения и инфраструктуры пространственных данных, действующая редакция которой в настоящее время в нашей стране отсутствует. Вместе с тем реализация нескольких государственных программ за последние два десятилетия позволила в значительной степени ликвидировать отставание нашей страны по уровню развития координатного обеспечения от ведущих мировых держав. Российская Федерация в соответствии со своими национальными интересами продолжает наращивать сеть измерительных комплексов с учетом международных рекомендаций. За 2022–2023 годы количество постоянно действующих пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети увеличилось более чем в два раза, а их количество достигло 101 единицы, в том числе 12 пунктов дублированы. В результате территория страны покрыта равномерной сетью постоянно действующих пунктов ГНСС-наблюдений. Продолжается модернизация отечественной радиоинтерферометрической сети телескопов «Квазар-КВО». На пунктах Зеленчукская, Бадары, Светлое установлены современные быстроповоротные радиотелескопы РТ-13<sup>4</sup>. Каждый пункт сети «Квазар-КВО» является пунктом колокации, который предоставляет свои измерения в Международную службу вращения земли и систем отсчета (МСВЗ) и оснащен аппаратурой ГНСС, квантово-оптической системой (КОС), а пункт Бадары в дополнение оборудован радиомаяком доплеровской системы DORIS (*англ.* Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). К 2030 году на базе Уссурийской астрофизической обсерватории в составе сети «Квазар-КВО» планируется ввести в эксплуатацию четвертый пункт колокации, оборудованный радиотелескопом РТ-13 и аппаратурой ГНСС и КОС. Ведутся работы по оснащению пунктов сети «Квазар-КВО» новым поколением КОС «Точка». Отечественная сеть лазерной локации спутников (ЛЛС) насчитывает 11 станций КОС (восемь

4 Введен в эксплуатацию радиотелескоп нового поколения РТ-13 // Министерство науки и высшего образования РФ: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/26501/> (дата обращения: 11.05.2025).

на территории РФ и три за ее пределами), на которых установлены преимущественно КОС «Сажень-ТМ» [5, 6]. Полностью развернута система ГЛОНАСС, орбитальная группировка которой пополняется навигационными аппаратами нового поколения. Продолжается размещение станций мониторинга системы ГЛОНАСС за рубежом. Функционирует космическая геодезическая система «ГЕО-ИК-2», в составе которой два космических аппарата.

Вышеперечисленные мероприятия не раскрывают полный перечень проводимых в государстве работ. Этот список можно дополнить, например, разработкой отечественного программного обеспечения по обработке и анализу геодезических измерений или успехами в области создания атомных стандартов частоты и поддержания национальной шкалы времени и пр., однако это выходит за рамки данной статьи.

## 3 Результаты и обсуждение

### 3.1 Установление общеземной геоцентрической системы координат

Запуск первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) 4 октября 1957 года положил начало космической геодезии<sup>5,6</sup>. Обработка фотографических наблюдений первых ИСЗ позволила уточнить сжатие Земли<sup>7</sup> и значения первых зональных гармоник, характеризующие ее внешнее гравитационное поле<sup>8</sup>. А с развитием методов космической триангуляции впервые удалось связать различные континенты и острова в единой системе координат.

Во второй половине 1950-х годов в Смитсоновской астрофизической обсерватории (*англ.* Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO) начала разрабатываться Программа по наблюдению ИСЗ (*англ.* Satellite Tracking Program, STP), которая выполнялась до 1983 года и имела две фазы<sup>9,10,11</sup>. В ее начале с использованием фотокамер Бейкера — Нанна (ФБН) выполнялись фотографические наблюдения и впервые (в 1959 году) была создана глобальная сеть из 12 станций<sup>12</sup> [7]. В 1961 году погрешность определения положения этих станций<sup>13</sup> составляла ~ 100–150 м, но уже в 1966 году в модели «Стандартная Земля» они были определены<sup>14</sup> с погреш-

5 Баранов В.Н., Бойко Е.Г., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 407 с.

6 Изотов А.А., Зубинский В.И., Макаренко Н.Л. и др. Основы спутниковой геодезии. М.: Недра, 1974. 320 с.

7 King-Hele D.G., Merson R.H. A new value for the Earth's flattening, derived from measurements of satellite orbits // *Nature*. 1959. Vol. 183. P. 881–882.

8 King-Hele D.G. The Earth's gravitational potential, deduced from the orbits of artificial satellites // *Geophysical Journal International*. 1961. Vol. 4. P. 3–16.

9 Lundquist C.A. Evolution of optical satellite tracking. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019\\_Lundquist\\_presentation.pdf](https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019_Lundquist_presentation.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).

10 Satellite Tracking Station Records / Smithsonian Astrophysical Observatory. Satellite Tracking Program, 1953–1968. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://siarchives.si.edu/collections/siris\\_arc\\_216832](https://siarchives.si.edu/collections/siris_arc_216832) (дата обращения: 16.04.2025).

11 SAO Loses Satellite-tracking Contract. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://siarchives.si.edu/collections/siris\\_sic\\_2175](https://siarchives.si.edu/collections/siris_sic_2175) (дата обращения: 16.04.2025).

12 Бойко Е.Г., Кленицкий Б.М., Ландис И.М. и др. Использование искусственных спутников Земли для построения геодезических сетей. М.: Недра, 1977. 376 с.

13 Veis G. The positions of the Baker-Nunn camera stations // *Research in Space Science*. SAO Special Report. 1961. No. 59. 5 p.

14 National Geodetic Satellite Program. Part 2. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 499 p.

ностью 10–20 м. С развитием квантово-оптических систем в 70-х годах XX века и вследствие недостаточной точности оптических наблюдений приоритет начал переходить к лазерной локации спутников<sup>15</sup>. К концу второй фазы сеть станций наблюдений состояла из шести колоцированных пунктов (КОС и ФБН), четырех фотографических (ФБН) и одной лазерной станции (КОС)<sup>16,17</sup>. Погрешность геоцентрического положения пунктов<sup>17</sup> не превышала 10 м. В этой программе, помимо США, принимали участие Франция, Греция и Япония<sup>16,17</sup>.

В СССР подобные работы начались в 1956 году с выходом постановления Правительства СССР, согласно которому на Академию наук СССР были возложены обязанности по созданию сети наблюдений ИСЗ и организации их наблюдений. В результате уже к октябрю 1957 года на территории СССР были развернуты 66 станций, а несколько десятков станций — за границей СССР. В конце 1963 года Министерством обороны СССР были инициированы работы по созданию общеземной геодезической сети в единой советской системе координат по наблюдениям ИСЗ и уточнению геофизических параметров Земли в интересах топогеодезического обеспечения РВСН [8]. Для этих целей были созданы космические геодезические комплексы (КГК) «Геоид» и «ГЕО-ИК». В результате опытной эксплуатации КГК «Геоид» (1972–1977) было выполнено определение пунктов космической геодезической сети (КГС) в ОГСК «Параметры Земли 1977 года» с точностью, характеризующей погрешностью положения пунктов 20–25 м в среднем по Земле и 13 м — на территории страны [9]. По итогам летных испытаний КГК «ГЕО-ИК» (1982–1983) и совместной обработки данных обоих комплексов была выведена ОГСК «Параметры Земли 1985 года» с погрешностью положения пунктов КГС на территории страны 5 м и 10–15 м для других территорий [9]. По наблюдениям КГК «ГЕО-ИК» за 1985–1989 годы положение пунктов КГС в ОГСК было определено с абсолютной погрешностью 2–3 м, а также были обеспечены требования к точности взаимного положения пунктов наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС не хуже 0,5 м [9]. В 1992 году была принята ОГСК «Параметры Земли 1990 года», также полученная по данным КГК «ГЕО-ИК» [9]. Погрешность геоцентрического положения пунктов КГС в ней<sup>18</sup> составляла 2 м. Обработка полного набора данных КГК «ГЕО-ИК» была завершена к 1999 году, а погрешность абсолютного положения пунктов КГС не превышала 0,7 м. Эти данные затем использовались в модернизированной версии ОГСК «Параметры Земли 1990 года»<sup>19</sup> — ПЗ-90.02 [9]. Погрешность определения абсолютного положения пунктов в системе ПЗ-90.02 оценивалась в диапазоне 0,3–0,5 м [10].

С 1964 по 1977 год Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, NASA) провело Национальную геодезическую спутниковую программу (*англ.* National Geodetic Satellite Program, NGSP), которая первоначально была нацелена на уточнение геодезических и геофизических параметров, используемых при расчете орбит ИСЗ<sup>17,20</sup>. Для этого предстояло решить три задачи: определить точные координаты систем слежения, уточнить модель гравитационного поля Земли и выполнить взаимные сравнения и калибровку различных систем

15 Pearlman M.R. Early experience of the SAO Satellite-Tracking Program // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1983. Vol. 64. No. 25. P. 417–418.

16 Lundquist C.A. Evolution of optical satellite tracking. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019\\_Lundquist\\_presentation.pdf](https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019_Lundquist_presentation.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).

17 National Geodetic Satellite Program. Part 2. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 499 p.

18 Галазин В.Ф., Каплан Б.Л., Лебедев М.Г. и др. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90): справочный документ / под ред. В.В. Хвостова. М.: КНИЦ, 1998. 38 с.

19 Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.02): параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли. М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2006. 60 с.

20 National Geodetic Satellite Program. Part 1. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 527 p.

слежения<sup>21,22</sup>. В рамках решения первой задачи требовалось установить достаточное количество опорных пунктов с погрешностью их местоопределения  $\pm 10$  м для связи региональных систем координат в единой глобальной системе<sup>21,22</sup>. В процессе реализации программы использовались фотографические, радиодальномерные, доплеровские, лазерные и фазовые дальномерные измерения<sup>23</sup>. Наблюдения выполнялись на базе обширной глобальной сети из более 260 станций, принадлежащих шести основным организациям — участницам программы. Колоцирование нескольких техник осуществлялось на ~60 пунктах<sup>23</sup>. В результате были определены координаты этих пунктов в североамериканской, европейской, южноамериканской, токийской и австралийской геодезических системах координат, а погрешности в связях между этими системами были уменьшены<sup>21</sup> не менее чем на 50 %. Участниками программы были получены по меньшей мере семь независимых координатных решений, а погрешность абсолютного положения станций<sup>21,23</sup>, как правило, оценивалась в диапазоне от 2 до 10 м.

В 1971 году французским Национальным центром космических исследований (*фр.* Centre National d'Études Spatiales, CNES) был инициирован первый Международный эксперимент по спутниковой геодезии (*англ.* International Satellite Geodesy Experiment, ISAGEX), в котором приняли участие США, СССР и Чехословакия<sup>24,25,26</sup>. Эксперимент заключался в проведении лазерно-фотографической кампании наблюдений ИСЗ, оснащенных лазерными уголковыми отражателями<sup>25</sup>. В результате эксперимента были определены 14 орбитальных дуг<sup>24,27</sup>, которые затем использовались в качестве дополнительных данных для создания глобальной модели Земли — «Стандартная Земля III» [11]. По фотографическим наблюдениям специалисты Смитсоновской обсерватории также определили координаты 13 станций, участвовавших в эксперименте, погрешность абсолютного положения которых составила<sup>28</sup> 10–20 м. Сотрудники Центра космических полетов им. Годдарда по лазерным и фотографическим наблюдениям оценили координаты других наборов пунктов, участвовавших в эксперименте, с погрешностью ~20 м по каждой координатной оси<sup>25,29</sup>.

На рубеже 70–80-х годов XX века стало очевидно, что актуальная на то время концепция земных систем координат изжила себя и не отвечала перспективным требованиям потребителей. Участники 56-го коллоквиума Международного астрономического союза (МАС) по использованию опорных систем координат для изучения динамики Земли (Варшава, 1980) рекомендовали создать новую рабочую группу для выработки предложений по установлению и поддержанию новой единой земной системы координат, основанной на новых методах космической геодезии<sup>30</sup>. К тому времени широкое применение получили методы

- 
- 21 National Geodetic Satellite Program. Part 2. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 499 p.
  - 22 Rosenberg J.D. Objectives of the NGSP // Proceedings of the GEOS Program Review Meeting. 1968. No. 1. P. 19.
  - 23 National Geodetic Satellite Program. Part 1. Washington, D.C.: NASA, STIO, 1977. 527 p.
  - 24 Георгиев Н.И., Масевич А.Г., Клеицкий Б.М. и др. Использование оптических наблюдений искусственных спутников Земли для геодезии. София: Изд-во Болгарской Академии наук, 1979. 276 с.
  - 25 Marsh J.G., Douglas B.C., Klosko S.M. Analyses for precision reduced optical observations from the international satellite geodesy experiment (ISAGEX). Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 1973. 18 p.
  - 26 Kovalevsky J. Results of the "ISAGEX" campaign // Space Research XV. Proceedings of Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences of the 17th Plenary Meeting of COSPAR. Berlin: Akademie-Verlag, 1975. P. 3–15.
  - 27 Баранов В.Н., Бойко Е.Г., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 407 с.
  - 28 Gaposchkin E.M., Latimer J., Mendes G. Station coordinates in the standard earth 3 system and radiation-pressure perturbations from ISAGEX camera data. Cambridge: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1975. 50 p.
  - 29 Marsh J.G., Douglas B.C., Walls D.M. Geodetic results from ISAGEX data // Bulletin Géodésique. 1974. Vol. 116. P. 117–130.
  - 30 Wilkins G.A., Mueller I.I. Joint summary report of the IAU/IUGG working groups on the rotation of the Earth and the terrestrial reference system // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 771–788.

ЛЛС, лазерной локации Луны (ЛЛЛ)<sup>31</sup>, радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [12]. Для военных целей в 1964 году в США [13] и в 1967 году в СССР<sup>32</sup> были созданы доплеровские навигационные системы первого поколения TRANSIT и «Циклон» (позже «Цикада»), соответственно, началось развертывание ГНСС второго поколения — GPS (*англ.* Global Positioning System) в 1978 году и ГЛОНАСС в 1982 году<sup>33</sup>. Такой арсенал измерительных средств позволял решать задачи координатного обеспечения поистине в глобальном масштабе. Так, в результате эксплуатации системы TRANSIT была создана система координат World Geodetic System 1972 (WGS 72) с погрешностью определения координатной основы в диапазоне 1–2 м, а доплеровские наблюдения на пунктах ее сети TRANET впервые были использованы для целей геодинамики.

В период с 1978 по 1988 год совместной рабочей группой МАС и Международного союза геодезии и геофизики (МСГГ) по изучению вращения Земли был организован проект MERIT (*англ.* Monitor Earth-Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis), цель которого — мониторинг вращения Земли и взаимное сравнение методов его наблюдения и анализа<sup>34</sup> [14]. В 1980 году была учреждена рабочая группа по установлению единой земной системы координат COTES (*англ.* Conventional Terrestrial Reference System Working Group) в качестве вклада Международной ассоциации геодезии (МАГ) в проект MERIT<sup>34</sup> [15]. В рабочей группе COTES участвовали США, Франция, Бельгия, Япония и Польша, а в MERIT — Великобритания, США, Франция, Германия, Бельгия, Португалия, Нидерланды, СССР, КНР, Япония, Австралия<sup>34</sup>. Благодаря кооперации этих рабочих групп в 1981 году задачи проекта MERIT<sup>35</sup> были дополнены созданием новой общепринятой земной системы координат [14]. Совместная работа обеих групп позволила выполнить несколько кампаний наблюдений и их анализа<sup>34</sup>. Координационным центром проекта выступало Международное бюро времени (*фр.* Bureau International de l'Heure, ВИН), которое в 1985–1988 годах получило решения первых четырех международных систем координат ВТС (*англ.* ВИН Terrestrial System): ВТС84, ВТС85, ВТС86 и ВТС87 [15]. Для этого использовались РСДБ, ЛЛС, ЛЛЛ и доплеровские наблюдения<sup>36</sup>. Погрешность относительного положения пунктов в проекте MERIT составляла<sup>37</sup> менее 0,1 м.

До появления MERIT-COTES в качестве земной системы координат использовалась геоцентрическая система СИО/ВИН, ориентация которой задавалась по астрономическим координатам сети астрономических приборов, используемых Международной службой движения полюса (МСДП) и ВИН [15]. Такая концепция установления земной системы координат уже не отвечала современным требованиям, и поэтому к концу 1987 года по результатам реализации проекта MERIT были разработаны новые концепции земных и небесных систем координат. Также было рекомендовано организовать Международную службу вращения Земли, на которую возлагались функции по установлению и поддержанию Международной земной системы координат (*англ.* International Terrestrial Reference System, ITRS), Международной небесной системы координат

- 
- 31 Lundquist C.A. Evolution of optical satellite tracking. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019\\_Lundquist\\_presentation.pdf](https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3019_Lundquist_presentation.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).
- 32 Спутник «Циклон» — пионер космической навигации // Вестник ГЛОНАСС. 2012. 16 ноября. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/~E5Kcj> (дата обращения: 16.04.2025).
- 33 История развития ГНСС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/history.php> (дата обращения: 16.04.2025).
- 34 Wilkins G.A., Mueller I.I. Joint summary report of the IAU/IUGG working groups on the rotation of the Earth and the terrestrial reference system // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 771–788.
- 35 Wilkins G.A. A note on the origin, objectives and programme of Project Merit // Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics. Astrophysics and Space Science Library / E.M. Gaposchkin, B. Kołaczek (eds). Dordrecht: Springer, 1981. Vol. 86. P. 275–276.
- 36 Boucher C., Altamimi Z. Status of the realization of the ВИН Terrestrial System // The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics. 1988. Vol. 128. P. 107–114.
- 37 Wilkins G.A. The background to the MERIT/COTES recommendations on the terrestrial and celestial reference systems // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 81–84.

(англ. International Celestial Reference System) и определению параметров вращения Земли (ПВЗ)<sup>38</sup>. С января 1988 года МСВЗ начала свою работу [14], фактически заменив МСДП и взяв на себя функции отдела наблюдения за вращением Земли ВИН<sup>39</sup>.

В 1989 году МСВЗ представила предварительную реализацию своей земной системы координат ITRF-0, включающую в себя координаты 34 пунктов, основой которой послужило предыдущее решение ВИН — BTS87. Несколько позднее была представлена первая версия ITRS — ITRF88, созданная уже с опорой на ITRF-0 и реализованная координатами 96 пунктов<sup>40,41</sup>. После ITRF88 и вплоть до 1997 года<sup>42</sup> решения МСВЗ выходили практически ежегодно. Первые версии ITRF расшифровывались как Земная отсчетная основа МСВЗ (англ. IERS Terrestrial Reference Frame), а ITRS — как Земная система координат МСВЗ (англ. IERS Terrestrial Reference System).

Решение ITRF-0 было получено по измерениям только двух техник (РСДБ и ЛЛС), ITRF88 — трех (в дополнение использовали ЛЛЛ<sup>40</sup>), а ITRF91 — уже четырех (начали включать GPS-измерения) [16]. Начиная с решения ITRF93, данные ЛЛЛ, как правило, уже не использовались<sup>43</sup>, исключением стало решение ITRF2000<sup>44</sup>. При выводе ITRF94 впервые были использованы доплеровские измерения системы DORIS<sup>45</sup>, которая была развернута в 1986–1990 годах под руководством CNES для целей высокоточного определения орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и насчитывала 32 наземных радиомаяка<sup>46</sup>.

Повышению точности определения ЗСК в 1980-х годах способствовало также совершенствование методов космической геодезии в рамках американского проекта NASA по изучению динамики земной коры (англ. Crustal Dynamics Project, CDP) и европейского проекта WEGENER [17].

Проект CDP, запущенный NASA в 1979 году, имел целью изучение методами космической геодезии тектоники плит и динамики вращения Земли<sup>47</sup>. За время существования проекта (до декабря 1991 года) вместе с США в нем приняли участие представители 25 стран<sup>47</sup>. Реализация этого проекта послужила стимулом развития КОС и РСДБ-наблюдений, а погрешности этих наблюдений достигли миллиметрового уровня (в начале проекта погрешность измерений этих систем превышала 10 см). До 1985 года в тесном контакте с программой CDP осуществлялась программа по развитию и исследованию применения системы GPS. На пунктах РСДБ, задействованных в CDP, тестировались первые GPS-приемники, подтвердившие ожидаемую производительность навигационной системы (согласие полученных результатов с РСДБ оценивалось

38 Wilkins G.A., Mueller I.I. Joint summary report of the IAU/IUGG working groups on the rotation of the Earth and the terrestrial reference system // Highlights of Astronomy. 1986. Vol. 7. P. 771–788.

39 History of the IERS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/About/History/history.html> (дата обращения: 16.04.2025).

40 Boucher C., Altamimi Z. Evolution of the realizations of the Terrestrial Reference System done by the BIN and IERS (1984–1988) // IERS Technical Note. No. 4. P. 1–112.

41 McCarthy D.D. IERS Conventions 1992 // IERS Technical Note. No. 21. P. 1–95.

42 Keenan R., Blick G. Reference Frames in Practice Manual. FIG Publication No 64. 2nd ed. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://fig.net/resources/publications/figpub/pub64\\_2ed/Figpub64\\_2ed.pdf](https://fig.net/resources/publications/figpub/pub64_2ed/Figpub64_2ed.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).

43 ITRF93 solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://datacenter.iers.org/products/reference-systems/terrestrial/itrf/old/itrf93.ssc> (дата обращения: 16.04.2025).

44 ITRF2000 solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2000> (дата обращения: 16.04.2025).

45 ITRF94 solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itrf.ign.fr/ftp/pub/itrf/itrf94/ITRF94.REPORT>. (дата обращения: 16.04.2025).

46 About International DORIS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ids-doris.org/ids/organization/about-ids.html> (дата обращения: 16.04.2025).

47 Bosworth J.M., Coates R.J., Fischetti T.L. The development of NASA's crustal dynamics project // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. 1993. Vol. 25. P. 1–20.

в пределах погрешности GPS — 1–2 см)<sup>48</sup>. После 1985 года работы по взаимному сравнению GPS и РСДБ продолжились с целью постепенного перехода от РСДБ-наблюдений деформаций земной коры к их GPS-мониторингу<sup>48</sup>. В результате программы CDP была создана база данных CDDIS (*англ.* Crustal Dynamics Data Information System)<sup>48</sup>, которая содержит данные и продукты, собираемые глобальными геодезическими сетями (ГНСС, ЛЛС, РСДБ, DORIS), и архив продуктов МСВЗ. Таким образом, проект CDP внес большой вклад в деятельность МСВЗ по созданию и поддержанию ЗСК сантиметровой точности, основанной на наблюдениях РСДБ, ЛЛЛ и ЛЛС, и небесной системы координат, основанной на РСДБ-наблюдениях, с погрешностью несколько миллисекунд дуги<sup>49</sup> [17].

В Европе аналогом проекта CDP стала деятельность группы WEGENER (*англ.* Working Group of European Geoscientists for the Establishment of Networks for Earth-science Research), созданной в 1981 году для изучения геодинамики и гравитационного поля Земли методами космической геодезии, а также создания геодезических сетей в тектонически активных областях [18]. К 1998 году в ней участвовали профильные учреждения из 35 стран<sup>50</sup>. В 2013 году сообщество WEGENER пересмотрело свою миссию и, сохранив аббревиатуру, переориентировалось на развитие всемирной геодезической сети для исследования землетрясений и опасных экологических явлений [18]. Вклад проекта WEGENER, существующего уже более 40 лет, в развитие систем координат заключается в совершенствовании наземной геодезической инфраструктуры и предоставлении высокоточных координат и скоростей станций наблюдений.

Положительный опыт применения GPS-наблюдений для целей геодезии и геодинамики побудили МАГ в 1992 году создать глобальную сеть из 42 GPS-станций. А уже в 1994 году МАГ создает Международную службу GPS для целей геодинамики, которая в конце 1990-х годов меняет название на Международную службу GPS. В 2005 году с развитием системы ГЛОНАСС вновь происходит ее переименование на Международную службу ГНСС IGS (*англ.* International GNSS Service) [19]. В настоящее время сеть IGS насчитывает 528 постоянно действующих станций<sup>51</sup>. Такая плотность сети совместно с высокоточными результатами обработки измерительных данных — продуктами IGS — обеспечивает легкий и строгий доступ к ОГСК пользователям по всему миру [17]. По схожим мотивам, нацеленным на объединение сообщества поставщиков измерений и их потребителей, на рубеже тысячелетий (1998–2003) учреждаются Международная служба лазерной дальнометрии (*англ.* International Laser Ranging Service, ILRS, 1998), Международная служба РСДБ (*англ.* International VLBI Service, IVS, 1999) и Международная служба DORIS (*англ.* International DORIS Service, IDS, 2003).

В 2003 году, учитывая вклад МСВЗ в создание и развитие земной и небесной систем отсчета, организация получила свое современное наименование — Международная служба вращения Земли и систем отсчета<sup>52</sup>, а на рубеже тысячелетий удалось создать высокоточную общеземную геоцентрическую систему координат.

Резолюциями № 1 МАГ и № 2 МСГГ, принятыми на XX Генассамблее МСГГ (Вена, 1991), согласовано предложение МСВЗ использовать ITRS в качестве единой ЗСК и рекомендовано использовать ITRS напрямую или привязывать национальные системы координаты к ней при проведении высокоточного анализа геодезической, геодинамической или океанографической информации. Решением XXIV Генассамблеи МСГГ (Перуджа, 2007) система ITRS была принята

48 Bosworth J.M., Coates R.J., Fischetti T.L. The development of NASA's crustal dynamics project // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. 1993. Vol. 25. P. 1–20.

49 Feissel M., Bourquard D., Charlot P., et al. Earth orientation and related reference frames // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics. 1993. Vol. 24. P. 99–111.

50 Wilson P. An Introduction to the Working group of European Geo-scientists for the Establishment of Networks for Earth-science Research (WEGENER) // Journal of Geodynamics. 1998. Vol. 25. P. 177–178.

51 IGS Network. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://network.igs.org/> (дата обращения: 16.04.2025).

52 Рыжова Л.В. Международная служба вращения Земли. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/physics/text/4025057> (дата обращения: 16.04.2025).

в качестве приоритетной геоцентрической системы координат для научных и технических приложений. Таким образом, Международная земная система координат ITRS — это общеземная геоцентрическая трехмерная система координат, вращающаяся вместе с Землей в ее суточном движении в пространстве, устанавливаемая и поддерживаемая МСВЗ при содействии многих стран, на территориях которых расположены станции наблюдений.

## 3.2 Реализации общеземной геоцентрической системы координат

### 3.2.1 Классификация реализаций ОГСК

Реализацией ITRS может быть любая отсчетная основа, которая содержит необходимую численную информацию, удовлетворяющую определению основных элементов ITRS (начало, ориентация осей, масштаб) и их эволюции во времени<sup>53</sup>. Реализация достигается посредством определения точных координат (и скоростей) пунктов геодезической сети и может быть глобальной, региональной или локальной. Если определены только координаты пунктов, то такая реализация называется статической. При определении координат и скоростей движения пункта без рассмотрения природы сил, вызывающих данное изменение положения пункта, реализация называется кинематической. Если внешние силы все-таки рассматриваются в процессе определения решения, то такая реализация называется динамической.

Современные реализации ITRS создают путем обработки и анализа измерительных данных РСДБ, ГНСС, ЛЛС, системы DORIS, а решение может быть получено с использованием данных как одного, так и всех четырех методов наблюдений. Первичной реализацией ITRS является решение, предоставляемое МСВЗ под общим названием ITRF. Вторичной реализацией ITRS является любая другая земная система координат, имеющая нулевые значения параметров трансформирования к ITRF (7 параметров для статической реализации и 14 параметров для кинематической или динамической). Вторичные реализации выводятся на основе существующих первичной или вторичных реализаций и могут представлять собой сгущение ITRF на определенную территорию.

Вторичная реализация ITRS может быть представлена в виде системы координат, зафиксированной на земной поверхности сетью геодезических пунктов или станций с измерительными инструментами, которая может иметь глобальный, региональный или национальный охват. В первом случае речь идет о статической реализации, которая определяется только координатами станций на некоторую эпоху, а во втором рассматривается кинематическая (или динамическая) реализация, определяемая временными рядами координат станций на фиксированном временном интервале (например, суточные или недельные ряды).

Вторичная реализация ITRS может распространяться спутниковыми эфемеридами НКА, рассчитанными в земной системе координат как линейные или нелинейные функции времени. Бортовые эфемериды НКА в земной системе координат являются численным прогнозом траектории движения центра масс одного или нескольких искусственных спутников Земли, представленным в принятой земной системе координат данной ГНСС.

### 3.2.2 Первичная реализация

ITRF представляет собой набор координат и скоростей пунктов глобальной сети и служит основой для современных региональных и национальных систем отсчета. Точность решений ITRF последовательно улучшалась и в настоящий момент характеризуется погрешностями координат пунктов на уровне первых единиц миллиметров. Скорости станций ITRF описываются относительно

<sup>53</sup> ISO-19161-1-2020. Geographic information – Geodetic references. Part 1: The international terrestrial reference system (ITRS) / International Organization for Standardization, 2020. 16 p.

условия отсутствия вращения сети (No-Net-Rotation), при котором моменты импульса всех глобальных тектонических плит суммарно равны нулю. ITRF2005, 2008, 2014 и 2020 построены на наблюдениях РСДБ, ГНСС, ЛЛС и DORIS. Период обновления последних версий ITRF составляет 6 лет.

В первых реализациях ITRF88, 89 и 90 глобальное поле скоростей не определялось, а для описания движения пунктов была рекомендована<sup>54</sup> модель AM0-2. Начиная с ITRF91, совместно с координатами пунктов стали оценивать собственное поле скоростей [16]. Для ITRF91 – ITRF2008 характерна линейная модель движения пунктов, учитывающая только среднегодовые скорости, как это рекомендовано МСВЗ. Такой подход не учитывает некоторые факторы, необходимые для корректного описания движения станций, и, соответственно, правильного вычисления ее координат на требуемую эпоху. Поэтому в ITRF2014 впервые был применен измененный подход к моделированию движения геодезических пунктов [20]. Нововведения коснулись учета нелинейных составляющих движения, выраженных в годовых и полугодовых периодических членах, а также учета постсейсмической деформации, возникающей во временных рядах координат из-за деформации земной коры после землетрясения. Моделирование периодических составляющих движения станции осуществлялось путем добавления к комбинированной модели соответствующих параметров (коэффициентов) синусоидальных и косинусоидальных функций, в то время как постсейсмические деформации учитывались до объединения решений путем применения параметрических моделей, которые сначала были уравнены с ежедневными временными рядами координат станций IGS [20]. В ITRF2014 использовалось 4 модели постсейсмических деформаций: логарифмическая, экспоненциальная, логарифмическо-экспоненциальная и двойная экспоненциальная. В ITRF2020 была добавлена пятая модель – двойная логарифмическая [21].

В 2022 году была определена ITRF2020, в рамках которой были доработаны и получили дальнейшее развитие описанные выше новшества ITRF2014 в части моделирования нелинейного движения пунктов. Помимо координат и скоростей станций в решение ITRF2020 вошли ПВЗ и уточненные параметрические функции для точного описания нелинейных смещений станций, вызванных как сезонными явлениями, так и постсейсмической деформацией. Погрешность определения координат ее опорных пунктов не превышает 5 мм, а их стабильность составляет величину не более 0,5 мм/год [21]. В 2024 году вышла обновленная версия – ITRF2020-u2023, полученная путем добавления дополнительных измерительных данных за три года (2021,0–2024,0) к периоду данных оригинальной версии МЗСК с последующей их обработкой по аналогичному алгоритму (как в ITRF2020)<sup>55</sup>. К настоящему времени с 1989 года выпущено 14 решений ITRF.

### 3.2.3 Альтернативные реализации

Геодезический исследовательский институт Мюнхенского технологического университета (*нем.* Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – Technische Universität München, DGFI-TUM) и Лаборатория реактивного движения NASA (*англ.* Jet Propulsion Laboratory, JPL) выпускают собственные, альтернативные, решения ITRS: DTRF (*англ.* DGFI-TUM Terrestrial Reference Frame) и JTRF (*англ.* JPL Terrestrial Reference Frame) соответственно. Наличие нескольких решений позволяет оценить точность различных реализаций ITRS путем их сравнения<sup>56</sup>.

Первой альтернативной реализацией ITRS была DTRF2008, рассчитанная в 2010 году на основе тех же входных данных, что и ITRF2008. Ее отличие от исходного решения ITRF заключалось в методике комбинирования систем

54 Minster J.B., Jordan T.H. Present-day plate motions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1978. Vol. 83. P. 5331–5354.

55 IERS Message No. 517. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://datacenter.iers.org/data/2/message\\_517.txt](https://datacenter.iers.org/data/2/message_517.txt) (дата обращения: 16.04.2025).

56 Seitz M., Angermann D., Drewes H., et al. The DGFI realization of the International Terrestrial Reference System: the DTRF2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/ITRS\\_CC/DTRF2008.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/ITRS_CC/DTRF2008.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (дата обращения: 16.04.2025).

нормальных уравнений<sup>57</sup>. В 2016–2017 годах на основе ITRF2014 было получено альтернативное решение JTRF2014 [22]. При выводе JTRF2014 и ITRF2014 применялись одни и те же подходы к комбинированию, но использовалось разное программное обеспечение. В частности, для JTRF2014 применялась калмановская фильтрация. Различались также способы представления координат станций: в первом случае использовались недельные временные ряды координат станций, а во втором координаты станций рассчитывались на опорную эпоху. В 2016 году<sup>58</sup> было опубликовано решение DTRF2014, которое, как и ранее, было основано на собственной стратегии комбинирования<sup>59</sup>. Альтернативными решениями ITRF2020 являются DTRF2020 (получена в 2023 году)<sup>60</sup> и JTRF2020, обновленная версия которой (JTRF2020-u2022<sup>61</sup>) опубликована в 2025 году. По сравнению с предыдущим решением масштаб DTRF2020 впервые определен по наблюдениям ГНСС и РСДБ, также была впервые учтена постсейсмическая деформация станций и все три компонента неприливной нагрузки<sup>62</sup>. В JTRF2020<sup>63</sup> (и в JTRF2020-u2022) по сравнению с JTRF2014 использовалось уже другое программное обеспечение, возможности которого позволили определить суточные координаты станций, учесть постсейсмическую деформацию и региональные корреляции в координатах станций.

### 3.2.4 Реализации на базе станций ГНСС

С момента своего образования Международная служба ГНСС для описания своих продуктов (эфемериды НКА ГНСС, координаты и скорости пунктов сети IGS, ПВЗ и др.) использует собственную реализацию МЗСК, которая аналогична ITRF, но необходима для обеспечения взаимосогласованности продуктов IGS и исключения потенциального ухудшения их точности вследствие прямого использования других координатных систем (например, ITRF) [23].

Реализации IGS формируются ГНСС-станциями, которые берутся из соответствующих им решений ITRF. Координаты в этих двух системах практически идентичны, однако в реализации IGS в координаты станций могут вноситься поправки, вызванные необходимостью учета актуальных калибровок установленных на станциях антенн. Перечень станций, для которых эти поправки были введены, публикуется вместе с официальным решением IGS<sup>64</sup>. Параметры перехода между ITRF и соответствующей реализацией IGS равны нулю<sup>65</sup>.

Первая IGS-реализация, полученная в 1994 году из решения ITRF92, включала всего 13 GPS-станций, которые были колоцированы с ЛЛС и РСДБ, еще не имела

- 
- 57 Seitz M., Angermann D., Drewes H., et al. The DGFI realization of the International Terrestrial Reference System: the DTRF2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/ITRS\\_CC/DTRF2008.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/ITRS_CC/DTRF2008.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (дата обращения: 16.04.2025).
- 58 DTRF2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dtrf.dgfi.tum.de/en/dtrf2014/> (дата обращения: 16.04.2025).
- 59 Dick W., Altamimi Z. Description and evaluation of DTRF2014, JTRF2014 and ITRF2014 // IERS Technical Note. No 40. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote40/tn40.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote40/tn40.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (дата обращения: 16.04.2025).
- 60 IERS Message No. 484. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://datacenter.iers.org/data/2/message\\_484.txt](https://datacenter.iers.org/data/2/message_484.txt) (дата обращения: 16.04.2025).
- 61 IERS Message No. 520. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://datacenter.iers.org/data/2/message\\_520.txt](https://datacenter.iers.org/data/2/message_520.txt) (дата обращения: 16.04.2025).
- 62 DTRF2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dtrf.dgfi.tum.de/en/dtrf2020/> (дата обращения: 16.04.2025).
- 63 JTRF2020 Solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.jpl.nasa.gov/site/jsgt/jtrf/solutions/jtrf2020/> (дата обращения: 16.04.2025).
- 64 IGS MAIL No. 8238. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008234.html> (дата обращения: 16.04.2025); IGS MAIL No. 7399. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2016/001233.html> (дата обращения: 16.04.2025).
- 65 Keenan R., Blick G. Reference Frames in Practice Manual. FIG Publication No 64. 2nd ed. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://fig.net/resources/publications/figpub/pub64\\_2ed/figpub64\\_2ed.pdf](https://fig.net/resources/publications/figpub/pub64_2ed/figpub64_2ed.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).

собственного наименования. Начиная с 2000-х годов, спустя некоторое время после выпуска основной версии IGS-реализации, базирующейся на актуальном решении ITRF, Международная служба ГНСС стала обновлять свое решение, добавляя в него новые данные за более длительный период времени и (или) новые станции из своей сети. Таким образом, на сегодняшний день имеется 16 IGS-реализаций, последняя из которых (IGS20) была получена в 2022 году на основе 332 ГНСС-станций<sup>66</sup>. С февраля 2025 года действует обновленная версия этой реализации — IGb20, полученная из последнего официального решения ITRF — ITRF2020-и2023. В нее вошли координаты и скорости 343 пунктов IGS (332, входящих в предыдущее решение IGS20, и 11 новых)<sup>67</sup>.

### 3.2.5 Орбитальные реализации

Для высокоточного определения орбит НКА в каждой группировке ГНСС необходимо установить и поддерживать собственную ОГСК. Для этого координаты станций наземного комплекса управления (НКУ) каждой ГНСС должны быть заданы в этой системе. GPS распространяет World Geodetic System 1984 (WGS 84), ГЛОНАСС — «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11), Galileo — Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF), BDS — BeiDou Coordinate System (BDCS). Краткое описание этих систем приводится в [24]. Вычисленные орбиты НКА затем передаются потребителям посредством навигационного сообщения ГНСС, что позволяет определять положение потребителя в соответствии с этими орбитами.

В целях обеспечения совместимости и взаимодополняемости ГНСС их собственные ОГСК в настоящее время согласованы с первичными реализациями ITRS через различные версии ITRF. Все эти системы согласованы с ITRF на уровне 1 см, что достигается за счет совместного уравнивания станций мониторинга НКУ и постоянно действующих пунктов сети IGS, поэтому они имеют практически нулевые параметры связи по отношению к ITRF [24]. По различным оценкам [2, 24], точность согласования орбитальных реализаций ОГСК по отношению к ITRF характеризуется погрешностями 1–4 см для WGS 84, 3–4 см для BDCS, 2–5 см для GTRF и около 10 см для ПЗ-90.11.

### 3.2.6 Национальные и региональные системы координат

Развитие ГНСС позволило геодезическим и картографическим организациям по всему миру постепенно отказываться от классических горизонтальных картографических систем координат (геодезических исходных дат), таких как Европейская система координат 1950 года, Токийская система координат, Североамериканская система координат 1927 года, Система координат 1942 года, и от сотен других классических горизонтальных картографических систем координат, разработанных во многих странах для собственных нужд [2]. Им на смену пришли национальные и региональные пространственные прямоугольные системы координат, основанные на ГНСС-измерениях: национальная система координат США — North American Datum of 1983 (NAD 83), государственная система координат РФ для обеспечения геодезических и картографических работ — Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011); European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), используемая в Евросоюзе, Chinese Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000), применяемая в КНР. Все они выводились с опорой на ITRF, за исключением NAD 83, которая была согласована с ITRF только в последних реализациях. Фактически такие системы можно рассматривать как сгущение МЗСК на территории соответствующих стран или регионов.

<sup>66</sup> IGS Reference Frame. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://igs.org/wg/reference-frame/#documents> (дата обращения: 16.04.2025).

<sup>67</sup> IGS MAIL No. 8543. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2024/008539.html> (дата обращения: 16.04.2025).

### 3.3 Развитие общеземной геоцентрической системы координат

С развитием космических геодезических систем, позволяющих выполнять измерения в глобальном масштабе, стало возможным построение чисто геометрической глобальной системы координат, начало которой находится в центре масс Земли, ось абсцисс направлена в Гринвичский меридиан по экватору, ось аппликата совпадает с осью вращения Земли, а ось ординат дополняет систему до правой. С одной стороны, использование единой общеземной декартовой системы координат значительно упростило решение целого ряда как прикладных, так и научных задач, а с другой — растущие требования к точности побуждали установить систему координат, учитывающую эндогенные и экзогенные деформации в теле Земли [25].

#### 3.3.1 Глобальная система геодезических наблюдений

Возникшая на рубеже XX–XXI веков необходимость мониторинга пространственно-временной изменчивости Земли побудила научное сообщество приступить к созданию Глобальной системы геодезических наблюдений (*англ.* Global Geodetic Observing System, GGOS), анонсированной в 2003 году на Генассамблее МСГГ (Саппоро, Япония) и уже в 2005 году вошедшей в фазу реализации. Система GGOS — это проект МАГ для наблюдения за геодезическими параметрами и их вариациями во времени, для реализации которого требуется точная и стабильная система координат, жестко связанная с Землей. Погрешность установления такой системы координат должна быть не хуже 1 мм, а ее стабильность — не хуже 0,1 мм/год. Для достижения этих требований необходимы согласованные и открытые геодезические наблюдения, объединенные в рамках единой системы. Система наблюдений GGOS состоит из таких основных элементов, как:

- 1) инструменты для наблюдений;
- 2) инфраструктура сбора, передачи данных и обмена ими;
- 3) центры анализа, комбинирования и моделирования;
- 4) портал для доступа к создаваемым продуктам данных [26].

В 2023 году был опубликован Стратегический план GGOS, где были обозначены четыре основные перспективные цели глобальной системы наблюдений на будущее десятилетие (до 2034 года)<sup>68</sup>:

- 5) продемонстрировать пользу геодезии для общества;
- 6) внести вклад в развитие Глобальной геодезической системы координат (*англ.* Global Geodetic Reference System, GGRS);
- 7) развивать измерительную инфраструктуру, методы анализа данных и экспертизу геодезических методов;
- 8) задействовать все геодезические методы для проведения комплексных геодезических исследований и технологических разработок.

Для достижения этих целей и выполнения задач координационный офис и руководящий состав GGOS разрабатывают план работ на 4 года вперед. Текущий план рассчитан до 2027 года.

#### 3.3.2 Глобальная геодезическая система координат и ее реализация

Концепция GGOS задала требования к точности и стабильности ОГСК, которые могут быть достигнуты за счет построения качественно новой Глобальной геодезической системы координат GGRS и ее реализации — GGRF (*англ.* Global Geodetic Reference Frame) (в настоящий момент эти требования превышены в пять раз [21]). GGRS и GGRF были задуманы Комитетом экспертов ООН по глобальному управлению геопространственной информацией (*англ.* UN Committee

<sup>68</sup> Sanchez L., Miyahara B., Craddock A., et al. GGOS Strategic Plan 2024–2034. Geodesy for Science and Society. Vienna: GGOS Coordinating Office, Federal Office of Metrology and Surveying, 2023. 33 p.

of Experts on Global Geospatial Information Management, UN-GGIM) и реализуются МАГ<sup>69</sup>. GGRF была принята резолюцией ООН A/RES/69/266 «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» на 69-й сессии Генеральной ассамблеи ООН в 2015 году.

GGRS имеет наземную и небесную составляющие. Наземный компонент состоит из общих теоретических концепций описания пространственного положения точек на земной поверхности. Они, в свою очередь, описывают как геометрические характеристики этих точек (координаты в системе ITRS), так и их физические атрибуты (геопотенциал, физическая высота и сила тяжести). Основой небесного компонента выступает ICRS. Для их связи используются ПВЗ<sup>69</sup>.

GGRF представляет собой комплексную геодезическую отсчетную основу, с помощью которой пользователи могут определять и выражать свое местоположение на Земле, а также оценивать изменения Земли в пространстве и времени. В настоящее время в GGRF входят: ITRF, Международная небесная отсчетная основа (*англ.* International Celestial Reference Frame, ICRF) и реализации физических систем высот<sup>70</sup>. В будущем в GGRF будут включены Международная высотная отсчетная основа (*англ.* International Height Reference Frame, IHRF) и Международная гравиметрическая отсчетная основа (*англ.* International Gravity Reference Frame, IGRF)<sup>69</sup>. Пункты последних двух должны будут быть совмещены с фундаментальными обсерваториями для требуемой колокации методов измерений. Инфраструктурным базисом GGRF будет выступать многоуровневая система GGOS<sup>69</sup>.

GGRS и GGRF будут использоваться для сбора, управления и использования национальной геопространственной информации и глобального мониторинга Земли<sup>71</sup>. Данные, полученные в GGRS и GGRF, будут востребованы в координатно-временном и навигационном обеспечении, геодезии, картографии и других науках о Земле. Кроме того, эти системы будут вносить вклад в социально-экономическое развитие общества и обеспечение его защиты от стихийных бедствий и природных катаклизмов<sup>71</sup>.

### 3.3.3 Космический проект GENESIS

Следующим шагом, направленным на качественное развитие ОГСК, должен стать инновационный проект Европейского космического агентства GENESIS, суть которого состоит в сочетании и колокации четырех методов космической геодезии (ГНСС, ЛЛС, РСДБ и DORIS) на одной спутниковой платформе в космическом пространстве [27]. GENESIS будет представлять собой динамическую космическую геодезическую обсерваторию, несущую на себе геодезические приборы (ГНСС, ЛЛС, РСДБ и DORIS), привязанные друг к другу с помощью тщательно выверенных пространственных связей, и двигающуюся на средневысокой орбите [27] (высотой 6000 км и наклоном 95°)<sup>72</sup>. Планируемая масса космического аппарата GENESIS будет составлять около 400 кг.

Колокация измерительных методов в космосе должна устранить несоответствия и погрешности различных геодезических методов для достижения целей точности и стабильности МЗСК, одобренных различными международными организациями и научным сообществом [27]. Такие погрешности характерны в большей степени для наземных пунктов колокации. Так, при выводе ITRF2020 более чем 50 % измеренных пространственных связей на них имели

69 Description of the Global Geodetic Reference Frame. IAG Executive Committee, 2016. 5 p.

70 UN-GGIM Knowledge Base. GGRF. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ggim.un.org/knowledgebase/knowledgebasecategory37.aspx> (дата обращения: 16.04.2025).

71 UN GGIM Global Geodetic Reference Frame. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/GGRF\\_Wksp/08\\_Johnston\\_2019\\_UN-GGIM\\_GGRF.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/GGRF_Wksp/08_Johnston_2019_UN-GGIM_GGRF.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).

72 Gidlund S., Enderle W., Navarro V., et al. GENESIS – A Multi-Technique Geodetic Observatory in Space // 64th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee. Baltimore, USA, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/enderle.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).

погрешности, превышающие 5 мм при допустимой величине<sup>73</sup> в 1 мм. Кроме того, сами пункты колокации расположены на Земле неравномерно, а их количество немногочисленно и редко обновляется. Но при этом пункты колокации на Земле все равно будут играть важную роль в рассматриваемой миссии и служить для нее вспомогательной наземной инфраструктурой [27]. Выполнение поставленных целей по точности и стабильности ITRF является одной из основных задач всей миссии [27].

Другой важной задачей GENESIS является улучшение связи МЗСК с ICRF благодаря более стабильным ПБЗ. В частности, это позволит впервые связать орбитальные реализации ITRF и ICRF<sup>74,75</sup>. Ожидается, что помимо геодезии результаты миссии GENESIS будут востребованы и в других областях: навигации, метрологии, геодинамике и других науках о Земле [27]. В настоящий момент миссия находится на этапе обсуждения предварительного проекта<sup>76</sup>, а ее старт планируется<sup>74,76</sup> на 2028 год. Предполагается, что срок ее функционирования составит порядка двух лет с возможностью продления<sup>76</sup>.

## 4 Выводы

С развитием космических геодезических систем, позволяющих выполнять измерения в глобальном масштабе, был организован ряд международных наблюдательных кампаний, в результате которых стало возможным определить координаты станций наблюдений в единой ОГСК. Усилиями Международного бюро времени, а впоследствии МСВЗ была установлена Международная земная система координат. Появление глобальных навигационных спутниковых систем второго поколения — GPS и ГЛОНАСС — сыграло ключевую роль как в развитии, так и в распространении МЗСК. К рубежу тысячелетий удалось установить МЗСК с погрешностью определения координат пунктов на уровне первых единиц сантиметров, а через 15 лет все ГНСС начали ее распространять через свои бортовые эфемериды с погрешностью менее 10 см. Появление ГНСС-технологий позволило национальным картографо-геодезическим службам постепенно переходить от классических горизонтальных систем к пространственной прямоугольной системе координат. Установление чисто геометрической ОГСК значительно упростило решение целого ряда прикладных и научных задач, но растущие требования к точности побудили развивать ОГСК для учета эндогенных и экзогенных деформаций в теле Земли. Необходимость мониторинга пространственно-временной изменчивости послужила драйвером создания Глобальной системы геодезических наблюдений, требующей построения качественно новой Глобальной геодезической системы координат повышенной точности и стабильности. Колокация нескольких методов космической геодезии в космосе в рамках запуска спутника GENESIS также должна продемонстрировать качественное улучшение точностных характеристик МЗСК.

73 Ventura-Travaset J., Enderle W. GENESIS: Collocation in space of four Geodetic // 16th Meeting of the International Committee on GNSS. Abu-Dhabi, UAE, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2022/ICG16/wgd-07.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).

74 Gidlund S., Enderle W., Navarro V., et al. GENESIS – A Multi-Technique Geodetic Observatory in Space // 64th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee. Baltimore, USA, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/enderle.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).

75 Enderle W., Schoenemann E., Springer T., et al. ESA's GENESIS Mission – At the foundation of Navigation // 17th Meeting of the International Committee on GNSS. Madrid, Spain, 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17/icg17\\_wgd\\_02\\_04.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17/icg17_wgd_02_04.pdf) (дата обращения: 16.04.2025).

76 Gidlund S., Fusco G., Waller P., et al. Overview of Genesis – an ESA mission at the Foundation of Navigation // EGU General Assembly. Vienna, Austria, 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU25/EGU25-15776.html> (дата обращения: 16.04.2025).

В настоящее время ОГСК базируется на большом количестве постоянно действующих наземных станций ГНСС, ЛЛС, РСДБ и DORIS, а ее установление обеспечивается многоуровневой обработкой разнородной измерительной информации. Поддержание стабильности ОГСК достигается за счет полного учета годовых скоростей движения станций, а распространение ОГСК для большинства потребителей реализуется сигналами ГНСС. Перспективы развития ОГСК связаны с установлением качественно новой общеземной геодезической системы координат, включающей геометрическую и физическую отсчетные основы; с запуском спутника GENESIS, который будет реализовывать принцип колокации нескольких типов измерений в космосе; с достижением беспрецедентного миллиметрового уровня точности в определении координат и скоростей опорных пунктов, который задан в проекте GGOS.

Проведенный анализ показал, что развитие методов наблюдений и совершенствование геодезической инфраструктуры как наземного, так и космического базирования позволяет уже сегодня определять координаты опорных пунктов с погрешностью не хуже 5 мм. Это было бы невозможным без международной кооперации большого числа стран-участниц для реализации вышеописанных наблюдательных кампаний, международных ассоциаций и союзов, космических программ и иных проектов в области наук о Земле. В то же время каждое государство, имея национальные интересы, развивает с опорой на международные ресурсы собственную, независимую геодезическую инфраструктуру, от качества которой будет зависеть точность координатных определений. Существующий на сегодняшний день потенциал позволяет России самостоятельно решать вопросы координатного обеспечения на должном уровне в соответствии с национальными приоритетами, а также принимать полноценное участие в международных программах.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование частично выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FSFE-2023-0005 «Фундаментальные и поисковые исследования путей повышения эффективности комплексного использования разнородных пространственных данных в интересах ускорения цифровой трансформации экономики и обеспечения устойчивого развития территорий Российской Федерации».

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Boucher C., Altamimi Z. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters // *Journal of Geodesy*. 2001. Vol. 75. P. 613–619. DOI:10.1007/s001900100208.
2. Malys S., Solomon R., Drotar J., et al. Compatibility of Terrestrial Reference Frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019 // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 67. No. 2. P. 834–844. DOI:10.1016/j.asr.2020.11.029.
3. Горобец В.П., Демьянов Г.В., Майоров А.Н. и др. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат // *Геопрофи*. 2013. № 6. С. 4–9.
4. Непоклонов В.Б., Гусев И.В., Вшивкова О.В. и др. Перспективы использования российской космической геодезической системы в научной и социально-экономической сфере // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2023. Т. 67. № 4. С. 6–25. DOI:10.30533/GiA-2023-016.
5. Кузин С.П. Станции колокации в космической геодезии и требования к ним // *Научные труды Института астрономии РАН*. 2022. Т. 7. № 4. С. 233–236. DOI:10.51194/INASAN.2022.7.4.002.
6. Кузин С.П. Современное состояние основных российских спутниковых геодезических сетей и перспективы их развития // *Научные труды Института астрономии РАН*. 2022. Т. 7. № 3. С. 208–211. DOI:10.51194/INASAN.2022.7.3.004.
7. Pearlman M., Brachet G., Lefebvre M., et al. The Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) and the Centre National d'Études Spatiales (CNES): contributions to the international laser ranging network // *Journal of Geodesy*. 2019. Vol. 93. P. 869–875. DOI:10.1007/s00190-018-1209-0.
8. Воронов Л.В. Космическая геодезия на службе обороны страны // *70 лет 29 Научно-исследовательскому институту Министерства обороны Российской Федерации / под ред. Н.И. Конона. М.: 29 НИИ МО РФ, 2006. С. 41–44.*

9. Зуева А.И., Рогозин В.П. Космическая геодезия на рубеже тысячелетий // 70 лет 29 Научно-исследовательскому институту Министерства обороны Российской Федерации / под ред. Н.И. Конона. М.: 29 НИИ МО РФ, 2006. С. 127–133.
10. Козлов С.В., Зуева А.Н., Новиков Е.В., Плешаков Д.И. Итоги модернизации и перспективы развития системы геодезических параметров ПЗ-90 в целях повышения точности геодезического обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2015. № 35. С. 11–16.
11. Barlier F., Lefebvre M. A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences // The Century of Space Science / Bleeker J.A.M., Geiss J., Huber M.C.E. (eds.). Dordrecht: Springer, 2001. P. 1623–1651.
12. Матвеев Л.И. История РСДБ — становление и развитие // Сообщения Института прикладной астрономии РАН. СПб., 2007. № 176. 35 с.
13. Повалыев Е., Хуторной С. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Часть 1 // Chip News. Инженерная микроэлектроника. 2001. № 10. С. 48–55.
14. Wilkins G.A. Project MERIT and the formation of the International Earth Rotation Service // International Astronomical Union Colloquium. 2000. No. 178. P. 187–200. DOI:10.1017/S0252921100061339.
15. Boucher C. Geodetic Reference Frames: 40 Years of Technological Progress and of International Cooperation: 1970–2010 // Reference Frames for Applications in Geosciences. International Association of Geodesy Symposia. Altamimi Z., Collilieux X. (eds.). Heidelberg: Springer, 2013. Vol. 138. P. 1–4.
16. Bosy J. Global, regional and national geodetic reference frames for geodesy and geodynamics // Pure and Applied Geophysics. 2014. Vol. 171. No. 6. P. 783–808. DOI:10.1007/s00024-013-0676-8.
17. Pearlman M., Altamimi Z., Beck N., et al. Global Geodetic Observing System – considerations for the geodetic network infrastructure // Geomatica. 2006. Vol. 60. No. 2. P. 193–204.
18. Ozener H., Zerbini S., Bastos L., et al. WEGENER: World earthquake GEodesy network for environmental hazard research // Journal of Geodynamics. 2013. Vol. 67. P. 2–12. DOI:10.1016/j.jog.2012.12.005.
19. Moore A.W. The International GNSS Service: Any questions? // GPS World. 2007. No. 1. P. 58–64.
20. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., et al. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear station motions: ITRF2014 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121. P. 6109–6131. DOI:10.1002/2016JB013098.
21. 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. P. 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
22. Abbondanza C., Chin T.M., Gross R.S., et al. JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the International Terrestrial Reference System // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. Vol. 122. No. 10. P. 8474–8510. DOI:10.1002/2017JB014360.
23. Ray J., Dong D., Altamimi Z. IGS reference frames: status and future improvements // GPS Solutions. 2004. Vol. 8. P. 251–266. DOI:10.1007/s10291-004-0110-x.
24. Гусев И.В., Голубицкий А.М. Оценка согласованности орбитальных реализаций систем координат, распространяемых глобальными навигационными спутниковыми системами, с Международной земной системой координат ITRF за 2020–2023 гг. // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 5164. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1004-2-51-64.
25. Herring T.A. Overview // Treatise on Geophysics. Vol. 3: Geodesy / Schubert G., Herring T.A. (eds.). Cambridge: Elsevier, 2007. P. 1–10.
26. Plag H.P., Pearlman M. Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Berlin: Springer, 2009. 367 p.
27. Delva P., Altamimi Z., Blazquez A., et al. GENESIS: co-location of geodetic techniques in space // Earth, Planets and Space. 2023. Vol. 75. P. 5. DOI:10.1186/s40623-022-01752-w.

**АВТОРЫ** **Гусев Игорь Витальевич**

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,  
Королёв, Россия

Информационно-аналитический центр координатно-временного  
и навигационного обеспечения

канд. техн. наук

 0000-0002-5843-2688

**Голубицкий Андрей Михайлович**

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,  
Королёв, Россия

Информационно-аналитический центр координатно-временного  
и навигационного обеспечения

 0000-0001-7337-2348

**Непклонов Виктор Борисович**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия;

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

Москва, Россия

кафедра высшей геодезии, геодезический факультет

д-р техн. наук

 0000-0003-1241-1117

Поступила 15.05.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Research on the development issues of coordinate support

Igor V. Gusev<sup>1</sup>, Andrey M. Golubitskiy<sup>1</sup>, Viktor B. Nepoklonov<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup> Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ vbnep@miigaik.ru

**CITATION** Gusev IV, Golubitskiy AM, Nepoklonov VB. Research on the development issues of coordinate support. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 22–43. DOI:10.30533/GiA-2025-049.

**KEYWORDS** space geodetic complex, coordinate support, geocentric reference system, GNSS, IERS, GENESIS, GGOS, GGRF, ITRF, ITRS

**ABSTRACT** The goal of the work is to identify promising areas for the development of coordinate support as a basis for sustainable socio-economic development. From the standpoint of systems analysis, the technological aspects of establishing, maintaining, developing and distributing the global geocentric reference system (GGCRS) are studied. Various GGCRS realizations are considered, including primary realizations based on the ITRF network, alternative solutions obtained by leading foreign centers, realizations based on the International GNSS Service stations and realizations based on the orbital approach. The conducted analysis took into account the state of affairs in the field of domestic space geodesy and its use in the interests of coordinate support. Among the main achievements noted is the fact that during this time in the USSR and the Russian Federation, using the space geodetic complexes “Geoid” and “GEO-IK”, the GGCRS “Parametry Zemli 1977, 1985 and 1990” were created. Today, the prospects for the development of GGCRS are associated with the establishment of a qualitatively new global geodetic reference system, including geometric and physical reference frames; the GENESIS satellite launch, which will implement the principle of several measurements types colocation in space; the achievement of an unprecedented millimeter level of accuracy in determining the coordinates and velocities of reference points, which is specified in the GGOS project.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The research was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment FSFE-2023-0005 “Fundamental and exploratory research on ways to improve the efficiency of integrated use of heterogeneous spatial data to accelerate the digital transformation of the economy and ensure sustainable development of the territories of the Russian Federation”.

## REFERENCES

1. Boucher C, Altamimi Z. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters. *Journal of Geodesy*. 2001;75: 613–619. DOI:10.1007/s001900100208.
2. Malys S, Solomon R, Drotar J, et al. Compatibility of Terrestrial Reference Frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019. *Advances in Space Research*. 2020;67(2): 834–844. DOI:10.1016/j.asr.2020.11.029.
3. Gorobets VP, Dem'yanov GV, Maiorov AN, et al. Sovremennoe sostoyanie i napravleniya razvitiya geodezicheskogo obespecheniya RF. Sistemy koordinat [Current state and directions of development of geodetic support of the Russian Federation. Coordinate systems]. *Geoprofi*. 2013;(6): 4–9. (In Russian).
4. Nepoklonov VB, Gusev IV, Vshivkova OV, et al. Perspektivy ispol'zovaniya rossiiskoi kosmicheskoi geodezicheskoi sistemy v nauchnoi i sotsial'no-ekonomicheskoi sfere [Use of the russian space geodetic system for science and social and economic sphere]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2023;67(4): 6–25. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-016.
5. Kuzin SP. Stantsii kolokatsii v kosmicheskoi geodezii i trebovaniya k nim [Collocation stations in space geodesy and their requirements]. *INASAN Science Reports*. 2022;7(4): 233–236. (In Russian). DOI:10.51194/INASAN.2022.7.4.002.
6. Kuzin SP. Sovremennoe sostoyanie osnovnykh rossiiskikh sputnikovyykh geodezicheskikh setei i perspektivy ikh razvitiya [The current status of the main Russian satellite geodetic networks and prospects of their development]. *INASAN Science Reports*. 2022;7(3): 208–211. (In Russian). DOI:10.51194/INASAN.2022.7.3.004.
7. Pearlman M, Brachet G, Lefebvre M, et al. The Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) and the Centre National d'Études Spatiales (CNES): contributions to the international laser ranging network. *Journal of Geodesy*. 2019;93: 869–875. DOI:10.1007/s00190-018-1209-0.
8. Voronov LV. Kosmicheskaya geodeziya na sluzhbe oborony strany [Space geodesy in the service of national defense]. *70 let 29 Nauchno-issledovatel'skomu institutu Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii*. Konon NI. (ed.). Moscow: 29 NII MO RF; 2006. P. 41–44. (In Russian).
9. Zueva AI, Rogozin VP. Kosmicheskaya geodeziya na rubezhe tysyacheletii [Space geodesy at the turn of the millenium]. *70 let 29 Nauchno-issledovatel'skomu institutu Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii*. Konon NI. (ed.). Moscow: 29 NII MO RF; 2006. P. 127–133. (In Russian).
10. Kozlov SV, Zueva AN, Novikov EV, Pleshakov DI. Itogi modernizatsii i perspektivy razvitiya sistemy geodezicheskikh parametrov PZ-90 v tselyakh povysheniya tochnosti geodezicheskogo obespecheniya global'noi navigatsionnoi sputnikovoi sistemy GLONASS [The Results and Prospects of the PZ-90 Development for a Higher Precision of the GLONASS Geodetic Service]. *Transactions of IAA RAS*. 2015;35: 11–16. (In Russian).
11. Barlier F, Lefebvre M. A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences. *The Century of Space Science*. Bleeker JAM., Geiss J, Huber MCE. (eds.) Dordrecht: Springer; 2001: 1623–1651.
12. Matveenko LI. Istoriya RSDB – Stanovlenie i razvitie [The VLBI history: coming into being and developing]. *IAARAS Messages*. Saint Petersburg, 2007;176. 35 p. (In Russian).
13. Povalyaev E, Khutornoi S. Sistemy sputnikovoi navigatsii GLONASS i GPS. Chast' 1 [GLONASS and GPS satellite navigation systems. Part 1]. *Chip News. Engineering microelectronics*. 2001;10: 48–55. (In Russian).
14. Wilkins GA. Project MERIT and the formation of the International Earth Rotation Service. *International Astronomical Union Colloquium*. 2000;178: 187–200. DOI:10.1017/S0252921100061339.
15. Boucher C. Geodetic Reference Frames: 40 Years of Technological Progress and of International Cooperation: 1970–2010. *Reference Frames for Applications in Geosciences. International Association of Geodesy Symposia*. Altamimi Z, Collilieux X. (eds.) Heidelberg: Springer; 2013(138): 1–4.
16. Bosy J. Global, regional and national geodetic reference frames for geodesy and geodynamics. *Pure and Applied Geophysics*. 2014;171(6): 783–808. DOI:10.1007/s00024-013-0676-8.
17. Pearlman M, Altamimi Z, Beck N, et al. Global Geodetic Observing System – considerations for the geodetic network infrastructure. *Geomatica*. 2006;60(2): 193–204.

18. Ozener H, Zerbini S, Bastos L, et al. WEGENER: World earthquake geodesy network for environmental hazard research. *Journal of Geodynamics*. 2013;67: 2–12. DOI:10.1016/j.jog.2012.12.005.
19. Moore AW. The International GNSS Service: Any questions? *GPS World*. 2007;1: 58–64.
20. Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear station motions: ITRF2014. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016;121: 6109–6131. DOI:10.1002/2016JB013098.
21. Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*. 2023;975: 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
22. Abbondanza C, Chin TM, Gross RS, et al. JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the International Terrestrial Reference System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017;122(10): 8474–8510. DOI:10.1002/2017JB014360.
23. Ray J, Dong D, Altamimi Z. IGS reference frames: status and future improvements. *GPS Solutions*. 2004;8: 251–266. DOI:10.1007/s10291-004-0110-x.
24. Gusev IV, Golubitskii AM. Otsenka soglasovannosti orbital'nykh realizatsii sistem koordinat, rasprostranyaemykh global'nymi navigatsionnymi sputnikovymi sistemami, s Mezhdunarodnoi zemnoi sistemoi koordinat ITRF za 2020–2023 gg. [Compatibility assessment of the reference frames orbital realizations broadcasted by the global navigation satellite systems with the International terrestrial reference frame (ITRF) during 2020–2023]. *Geodesy and Cartography*. 2024;2: 51–64. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1004-2-51-64.
25. Herring TA. Overview. *Treatise on Geophysics, Volume 3: Geodesy*. Schubert G, Herring TA. (eds.) Cambridge: Elsevier; 2007: 1–10.
26. Plag HP, Pearlman M. Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Berlin: Springer; 2009. 367 p.
27. Delva P, Altamimi Z, Blazquez A, et al. GENESIS: co-location of geodetic techniques in space. *Earth, Planets and Space*. 2023;75: 5. DOI:10.1186/s40623-022-01752-w.

**AUTHORS Igor V. Gusev**

Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia  
 Information and Analysis Center for Positioning Navigation and Timing  
 PhD in Engineering  
 0000-0002-5843-2688

**Andrey M. Golubitskiy**

Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia  
 Information and Analysis Center for Positioning Navigation and Timing  
 0000-0001-7337-2348

**Viktor B. Nepoklonov**

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,  
 Moscow, Russia;  
 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Higher Geodesy, Faculty of Geodesy  
 Dr. of Sci. (Engineering)  
 0000-0003-1241-1117

Submitted: May 15, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Прогноз изменений типов прибрежных водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря с использованием модели SLAMM

Куен Динь Туен<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
✉ quyendinh TUYEN97@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Куен Динь Туен. Прогноз изменений типов прибрежных водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря с использованием модели SLAMM // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 44–60. DOI:10.30533/GiA-2025-020.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** прибрежные водно-болотные угодья, SLAMM, повышение уровня моря, изменение климата, дельта Красной реки, прогноз, Вьетнам

**АННОТАЦИЯ** Экосистемы водно-болотных угодий имеют решающее значение для сохранения экологической устойчивости, выполняя задачи по очистке воды, накоплению углерода и предотвращению наводнений. Однако изменение климата и повышение уровня моря угрожают этим экосистемам, особенно в прибрежных районах. В настоящем исследовании с помощью модели SLAMM (*англ.* Sea Level Affecting Marshes Model) оценивается воздействие повышения уровня моря на экосистемы водно-болотных угодий в межпровинциальном биосферном резервате «Дельта Красной реки» во Вьетнаме. Для моделирования изменений в экосистемах были использованы карты водно-болотных угодий, классифицированные на основе спутниковых снимков PlanetScope (2016–2022 годы) с разрешением 4,77 м по девяти типам земель. Эти карты, обработанные с применением глубокого обучения, были преобразованы в формат SLAMM. Сценарий, использованный в данном исследовании, основан на сценарии RCP8.5, который разработан Министерством природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама и предсказывает повышение уровня моря на 1 м к 2100 году. Результаты исследования показывают, что при данном сценарии повышение уровня моря приведет к значительным изменениям в распределении экосистем водно-болотных угодий, особенно мангровых лесов и приливно-отливных отмелей. Эти данные имеют важное значение для разработки адаптационных мер и стратегий устойчивого управления прибрежными экосистемами.

# 1 Введение

Водно-болотные угодья имеют большое значение для человека и природы, так как они способны фильтровать вредные вещества; накапливать углерод, что способствует сглаживанию последствий изменения климата; смягчать негативные эффекты экстремальных погодных условий; аккумулировать дождевую воду и ливневый сток во время штормов, снижая риск наводнений, и поддерживать водные запасы в засушливые периоды. Они обеспечивают биологическое разнообразие и служат средой обитания более чем для 100 тысяч видов организмов, а также являются источником продовольствия и создают возможности устойчивого развития для местного населения. Эти территории играют ключевую роль в регулировании климата, поддержании биологического разнообразия и защите береговой линии<sup>1</sup>. Тем не менее в условиях изменения климата и роста уровня моря возрастает давление на экосистемы водно-болотных угодий, особенно в прибрежных районах [1]. Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (*англ.* Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), средний уровень Мирового океана с начала XX века повысился примерно на 20 см и, согласно прогнозам, может увеличиться на 0,6–1 м к концу XXI века<sup>2</sup>. Во Вьетнаме дельта реки Меконг уже претерпела значительные изменения в связи с повышением уровня моря, что вызывает засоление и потерю сельскохозяйственных угодий, снижает продуктивность сельского хозяйства и угрожает экосистемам мангровых лесов [2]. Несмотря на то что повышение уровня моря представляет серьезную угрозу для всех прибрежных водно-болотных угодий, предыдущие исследования в основном сосредоточивались на оценке их уязвимости для соленого прилива. Поэтому необходимо разработать конкретные сценарии воздействия изменения климата, в которых основное внимание уделяется повышению уровня моря и изменениям в прибрежных водно-болотных угодьях, с целью комплексной оценки рисков и предложения эффективных адаптационных мер.

Вьетнам является прибрежным государством с протяженной береговой линией, охватывающей территорию от севера до юга, что способствует формированию богатых экосистем водно-болотных угодий<sup>3</sup>. Однако прибрежные экосистемы водно-болотных угодий испытывают постоянное давление со стороны изменения климата и антропогенной деятельности. Эти экосистемы подвергаются угрозе постоянного затопления в результате быстрого повышения уровня моря. У них также сокращаются возможности для адаптации, так как прибрежные территории все более интенсивно осваиваются человеком [3]. В этой связи управляющим прибрежными природоохранными территориями водно-болотных угодий необходимы соответствующие инструменты для оценки потенциального воздействия повышения уровня моря на разнообразные экосистемы водно-болотных угодий.

Прогнозирование изменений климата и их воздействия на водно-болотные угодья, а также оценка антропогенного влияния имеют важное значение для разработки более эффективных стратегий сохранения и восстановления местообитаний. Реакция водно-болотных угодий на повышение уровня моря может быть смоделирована с использованием прибрежных моделей воздействия. Так, модель влияния уровня моря на болота (*англ.* Sea Level Affecting

1 Чан Х.Т. Оценка эффективности модели устойчивого использования природных ресурсов моллюсков на пойменных территориях устья Красной реки в пределах национального парка Суантхуи (Намдинь) (перевод с вьетнамского языка) / Национальный экономический университет, 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dlib.neu.edu.vn/items/d39e5666-ab3f-48df-8bf0-5c34830da787> (дата обращения: 10.11.2024).

2 Сценарии изменения климата и повышения уровня моря для Вьетнама (перевод с вьетнамского языка) / Министерство природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://imh.ac.vn/files/doc/KichbanBDKH/Kich%20ban%20Bien%20doi%20khi%20hau\\_2009.pdf](https://imh.ac.vn/files/doc/KichbanBDKH/Kich%20ban%20Bien%20doi%20khi%20hau_2009.pdf) (дата обращения: 10.11.2024).

3 Ле В.К. Водно-болотные угодья. Ханой: Образование, 2005. 215 с. (На вьетнамском языке).

Marshes Model, SLAMM) позволяет определить местообитания с подходящими гидрогеологическими условиями, менее подверженные воздействию повышения уровня моря, на основе ряда ключевых гидрологических и биологических процессов [4]. SLAMM<sup>4</sup> создает прогнозные карты изменений водно-болотных угодий под воздействием быстрого повышения уровня моря и предоставляет детальную информацию о перемещении местообитаний, обусловленном повышением уровня моря<sup>5</sup>.

Модель SLAMM широко используется в различных исследованиях для прогнозирования воздействия повышения уровня моря на водно-болотные угодья, что способствует разработке стратегий управления ими и их сохранения. Так, К.Е. Акуму (C.E. Akumu) применил SLAMM для прогнозирования изменений мангровых лесов под воздействием повышения уровня моря, что позволило оценить их будущую пространственную распределенность [5]. А. Пайо (A. Paou) и его соавторы использовали SLAMM, чтобы подвергнуть анализу влияние повышения уровня моря на солончаковые болота в северо-западной части Тихоокеанского региона. Это помогло выявить перемещения и изменения ключевых местообитаний [6]. М. Коул Экберг (M. Cole Ekberg) применила SLAMM для оценки потерь и изменений водно-болотных угодий на юго-востоке США, и результаты данного исследования оказались значимыми для разработки мер по охране окружающей среды [7]. В работе М. Фернандеса-Нуньеса (M. Fernandez-Nunez) SLAMM использовалась для оценки потенциала и прогнозирования изменений солончаковых болот Атлантико-Средиземноморского региона Пуэрто-Рико под воздействием будущего повышения уровня моря и для приложений в управлении [8]. Кроме того, аналогичные исследования с применением SLAMM [9–11] способствовали созданию сценариев изменения водно-болотных угодий в будущем под влиянием климатических изменений.

В данном исследовании ставится цель оценить потенциальное воздействие повышения уровня моря на прибрежные экосистемы водно-болотных угодий в районе дельты Красной реки во Вьетнаме с использованием модели SLAMM. Основные задачи исследования включают:

- моделирование перемещений различных типов водно-болотных угодий при различных сценариях повышения уровня моря до 2100 года;
- определение изменений площади водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря;
- обсуждение полученных результатов и внесение вклада в совершенствование стратегии управления прибрежными экосистемами водно-болотных угодий и их охраны.

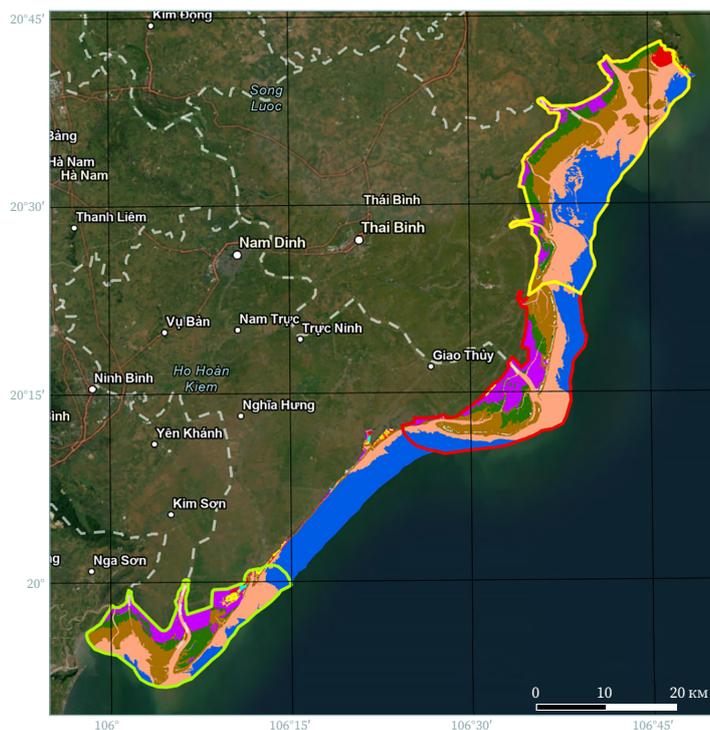
## 2 Материалы и методы

### 2.1 Область исследования

Межпровинциальный биосферный резерват прибрежных водно-болотных угодий «Дельта Красной реки» был признан ЮНЕСКО всемирным биосферным резерватом 2 декабря 2004 года и охватывает территории пяти уездов в трех провинциях — Намдинь, Ниньбинь и Тхайбинь (рис. 1). Эта территория имеет важное значение для сохранения биологического разнообразия Юго-Восточной Азии, особенно редких видов птиц. Крупные прибрежные мангровые леса

4 SLAMM: Sea Level Affecting Marshes Model / Warren Pinnacle Consulting, Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM/index.html> (дата обращения: 26.08.2024).

5 Brophy L.S., Ewald M.J. Modeling Sea level rise impacts to Oregon's tidal wetlands: Maps and prioritization tools to help plan for habitat conservation into the future. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical\\_reports/tt44ps38k](https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical_reports/tt44ps38k) (дата обращения: 12.10.2024).



**Рис. 1**  Межпровинциальный биосферный резерват прибрежных водно-болотных угодий «Дельта Красной реки» (Вьетнам)

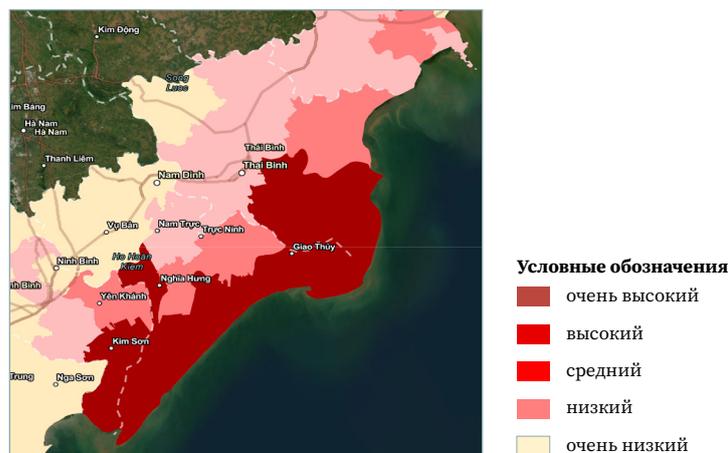
**Fig. 1** Red River Delta Interprovincial Coastal Wetland Biosphere Reserve (Vietnam)

помогают защитить береговую линию и противостоять стихийным бедствиям, поддерживая стабильность жизни для местного населения [12].

Согласно сценарию изменения климата во Вьетнаме, опубликованному Министерством природных ресурсов и окружающей среды (англ. Ministry of Natural Resources and Environment, MONRE) в 2020 году, под воздействием изменения климата экосистемы водно-болотных угодий подвергнутся влиянию и изменятся в будущем (рис. 2<sup>6</sup>). В случае реализации сценариев, предложенных в исследовании, к 2100 году эта территория водно-болотных угодий может испытать серьезное воздействие вследствие возможного повышения уровня моря<sup>7</sup> до 100 см. Поэтому необходимо разрабатывать адаптационные сценарии, включая сценарии воздействия повышения уровня моря на межпровинциальный резерват водно-болотных угодий в дельте Красной реки. Подобные сценарии также послужат основой для прогнозирования и планирования в других прибрежных регионах.

**Рис. 2**  Уровень воздействия повышения уровня моря на 1 м к 2100 году по сценарию Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама

**Fig. 2** Impact level of a 1 m sea level rise by 2100 according to Vietnam's Ministry of Natural Resources and Environment scenario



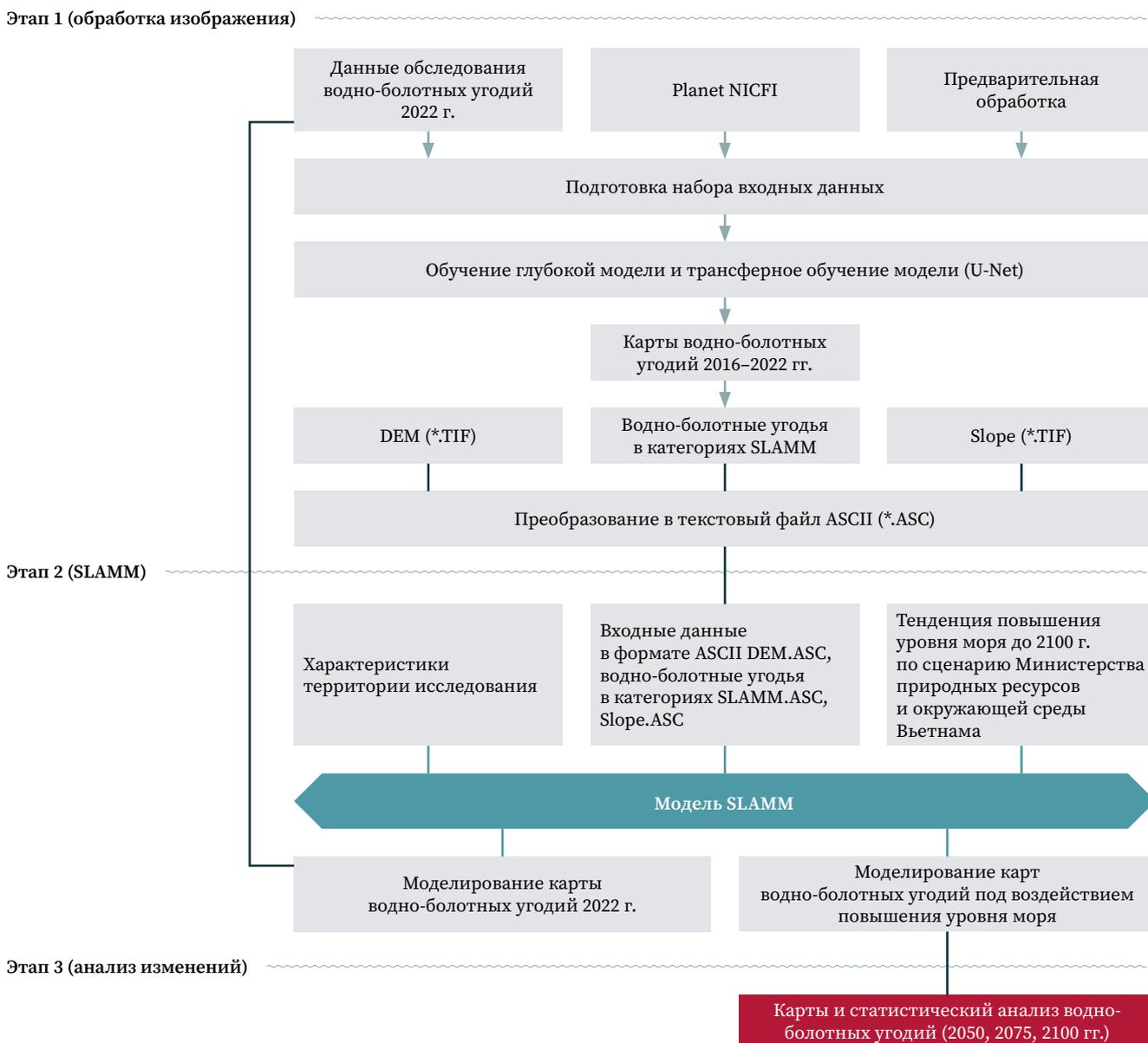
6 Центр адаптации к изменению климата (перевод с вьетнамского языка). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://adaptation.dcc.gov.vn> (дата обращения: 26.08.2024).

7 Нгуен В.Т., Фам Т.Т.Н., Хуинь Т.Л.Х. Сценарии изменения климата (перевод с вьетнамского языка) / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dcc.gov.vn/kien-thuc/1090/Kich-ban-bien-doi-khi-hau-cap-nhat-nam-2020.html> (дата обращения: 12.10.2024).

## 2.2 Методология исследования

Методологию данного исследования (рис. 3) составляют:

- подготовка данных спутниковых изображений и выполнение этапов предварительной обработки, включая анализ изображений для создания карт различных типов водно-болотных угодий, обработка цифровой модели высот (*англ.* Digital Elevation Model, DEM) и слоя уклона (*англ.* Slope);
- подготовка входных данных и настройка параметров для модели SLAMM с целью прогнозирования и представления сценариев повышения уровня моря, влияющих на водно-болотные угодья, в соответствии со сценарием RCP8.5 на 2050, 2075 и 2100 годы;
- проведение анализа и оценки изменения площади и распределения различных типов водно-болотных угодий, прогнозируемых до 2100 года.



**Рис. 3** Методология исследования

**Fig. 3** Research methodology

## 2.3 Подготовка входных данных

Модель SLAMM основана на принципе разделения пространства на однородные растровые ячейки для моделирования изменений окружающей среды, особенно в районах водно-болотных угодий. В этой модели такие входные данные, как высота и тип покрытия поверхности, играют важную роль в прогнозировании изменений водно-болотных угодий со временем под воздействием повышения уровня моря и других антропогенных факторов. Каждый слой данных тщательно собирается и обрабатывается для обеспечения высокой точности, что позволяет модели проводить детальный анализ взаимодействий экосистем водно-болотных угодий и непроницаемых покрытий. Эти этапы обработки данных способствуют оптимизации точности прогнозов и обеспечивают глубокое понимание возможных сценариев изменения климата [13].

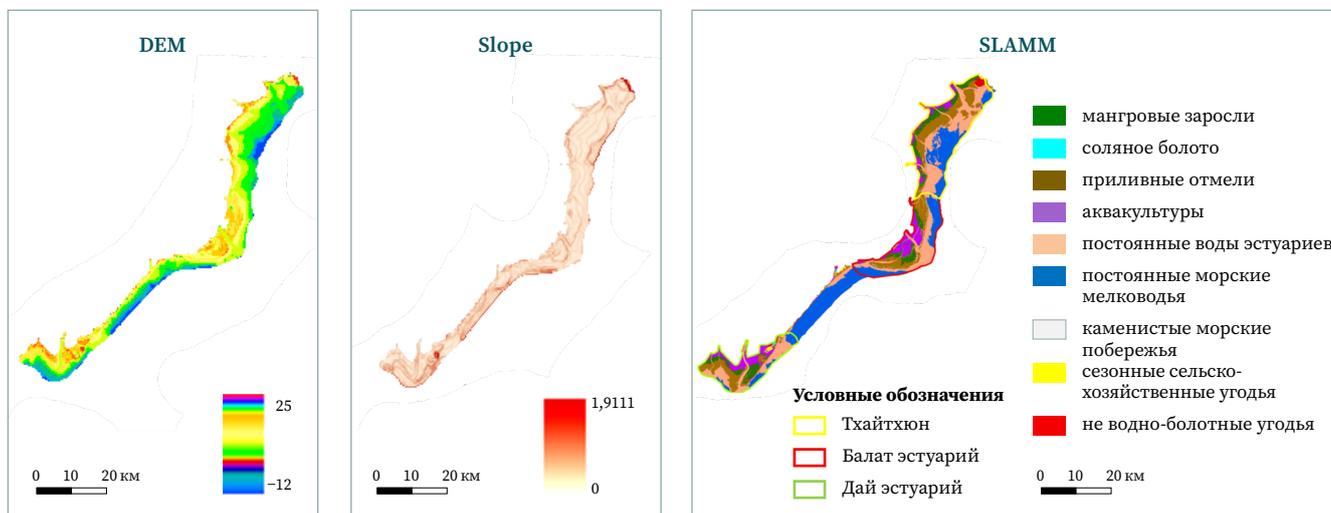
### 2.3.1 Данные высот

Высотные данные являются одним из трех основных источников данных для модели прогноза SLAMM, предоставляя важную информацию, позволяющую определить зоны, подверженные риску затопления или изменений, и, таким образом, классифицировать водно-болотные угодья по степени их чувствительности [13]. Высотные данные обычно собираются с помощью спутниковых снимков, технологии LiDAR или полевых измерений, что обеспечивает высокую детализацию и точность. В данной работе используются открытые высотные данные GEBCO, что позволило детально определить высоты прибрежных районов и континентального шельфа в зоне исследования. Благодаря высокой надежности и широкому охвату данные GEBCO являются важной основой для оценки воздействия повышения уровня моря на чувствительные районы.

После загрузки данные были интерполированы с пространственным разрешением 10 м и сглажены, а затем обрезаны по границам прогнозируемой территории (рис. 4, DEM). Данные были преобразованы из формата TIFF в текстовый формат ASC для интеграции в модель SLAMM. Для оптимизации времени обработки территория водно-болотных угодий была разделена на три ключевые зоны, что позволило уменьшить объем обработки и предоставить более детальное представление о каждой чувствительной зоне в рамках исследования. Высотные данные были привязаны к вертикальной системе отсчета уровня моря Хондау во Вьетнаме, которая базируется на среднем уровне моря, измеренном на приливной станции Хондау. Этот уровень используется для прибрежных провинций в дельте Красной реки, что обеспечивает согласованность в оценке прибрежных водно-болотных угодий и поддерживает анализ воздействия изменения климата и повышения уровня моря в этом регионе.

**Рис. 4**  Входные данные для модели SLAMM

**Fig. 4**  
Input data for the SLAMM model



### 2.3.2 Данные об уклоне

В модели SLAMM уклон является важным фактором для определения процессов перехода между классами водно-болотных угодий. Уклон рассчитывается на основе DEM и используется для определения процентного соотношения растровых ячеек, которые могут подвергнуться потере или переходу в другой класс. Точный уклон поверхности водно-болотных угодий позволяет модели прогнозировать проникновение соленой воды в различные зоны, что влияет на распределение и чувствительность типов водно-болотных угодий. Инструменты ГИС, такие как QGIS и ArcGIS, позволяют легко рассчитывать уклон на основе предварительно обработанных DEM (рис. 4, Slope). Использование уклона в модели является ключевым элементом для оценки воздействия повышения уровня моря на водно-болотные угодья.

### 2.3.3 Данные о прибрежных водно-болотных угодьях по категориям SLAMM

В этом исследовании растры, отображающие виды водно-болотных угодий, были созданы с использованием метода обработки спутниковых снимков PlanetScore с применением глубокого обучения и метода трансфера обучения для временных рядов с 2016 по 2022 год с разной точностью [14]. Точность модели глубокого обучения составила 91,3 %, что позволяет автоматически классифицировать прибрежные земли с использованием спутниковых данных PlanetScore с разрешением 4,77 м. Карты водно-болотных угодий, полученные в предыдущих исследованиях автора, были использованы в модели SLAMM в данном исследовании (рис. 4, SLAMM). Кодировки водно-болотных угодий с полученных карт были переведены автором в кодировки SLAMM, как указано в технической документации SLAMM 6.7<sup>8</sup>. Согласно этим данным, искусственные водно-болотные угодья для аквакультуры были преобразованы во внутренние пресноводные болота, а районы соляных полей — в солончаковые болота. Сельскохозяйственные угодья были классифицированы как неосвоенная суша, не водно-болотные угодья — как освоенная суша (табл. 1).

**Таблица 1**  Типы водно-болотных угодий в дельте Красной реки по категориям SLAMM

**Table 1** Wetland types of the Red River Delta by SLAMM category

Водно-болотные угодья	Код в ГИС по категориям SLAMM
Мангровые заросли	9
Соляные поля	7
Приливные отмели	11
Постоянные воды эстуариев	17
Аквакультуры	5
Постоянные морские мелководья	19
Песчано-галечные или галечные пляжи	14
Сезонные сельскохозяйственные угодья	2
Не водно-болотные угодья	1

Карты водно-болотных угодий в формате растров для различных лет с разрешением 4,77 м были классифицированы по девяти типам земель. Поэтому данные DEM и уклон также были выбраны с аналогичным разрешением для их использования в качестве входных данных в программе SLAMM с одинаковыми размерами ячеек. Процесс выборки, увеличения разрешения и обрезки изображений по одинаковым размерам, а также преобразование карты водно-болотных угодий в формат SLAMM были выполнены с помощью программы ArcMap 10.8.

<sup>8</sup> SLAMM 6.7 Technical Documentation / Warren Pinnacle Consulting, 2016. P. 40. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM\\_6.7\\_Technical\\_Documentation.pdf](https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM_6.7_Technical_Documentation.pdf) (дата обращения: 12.10.2024).

Затем все данные были преобразованы в формат ASCII file (\*.asc) для моделирования в программе SLAMM 6.7. Несмотря на то что карты водно-болотных угодий на 2022 год для исследуемой области уже были доступны, для анализа SLAMM была выбрана информация за 2016 год, поскольку данные наблюдений за период 2016–2022 годов использовались для оценки точности модели.

## 2.4 Модель SLAMM

SLAMM — это специализированный инструмент для моделирования воздействия повышения уровня моря (*англ.* Sea Level Rise, SLR) на экосистемы прибрежных водно-болотных угодий. Для выполнения моделирования SLAMM требует входных данных, включая карты водно-болотных угодий, цифровую модель высот и параметры уклона местности для определения степени воздействия колебаний уровня воды<sup>9</sup>. Другим важным фактором являются сценарии повышения уровня моря, которые были взяты из климатических моделей, таких как RCP8.5, согласно сценариям Министерства ресурсов и окружающей среды Вьетнама для провинций дельты Красной реки до 2100 года со сценарием максимально возможного повышения уровня моря<sup>10</sup>. Кроме того, SLAMM использует параметры оседания земли, скорости отложения осадков и эрозии, чтобы обеспечить точное отражение реальных условий, особенно в районах с чувствительным рельефом или на границе с открытыми водами.

Процесс настройки модели SLAMM проводится в соответствии с инструкциями по входным данным и установке параметров для модели. Опираясь на результаты предыдущих исследований, в данной статье автор рассматривает сценарии RCP8.5, разработанные Министерством ресурсов и окружающей среды Вьетнама в 2020 году, с использованием аналогичных прогнозов, представленных в специальных отчетах IPCC по океанам. Сценарии температуры RCP8.5 предсказывают увеличение на 2 °C к 2100 году, и уровень моря поднимется на 1 м к концу XXI века (рис. 5)<sup>11</sup>. В данном исследовании определяются конкретные временные моменты, такие как 2022, 2050, 2075 и 2100 годы, в соответствии с климатическими и экологическими сценариями Министерства ресурсов и окружающей среды Вьетнама, с учетом повышения уровня моря на 0,17 м, 0,35 м, 0,65 м и 1 м соответственно<sup>10</sup>.

В модели SLAMM, применяемой для дельты Красной реки, темпы аккумуляции мангровых лесов определяются на основе местных исследований и демонстрируют значительные изменения в зависимости от региона. Средний темп аккумуляции мангров в этом районе составляет около 10 мм/год [15]. Для настройки модели SLAMM, помимо данных о высотах и картографических данных, необходимо учитывать дополнительные параметры:

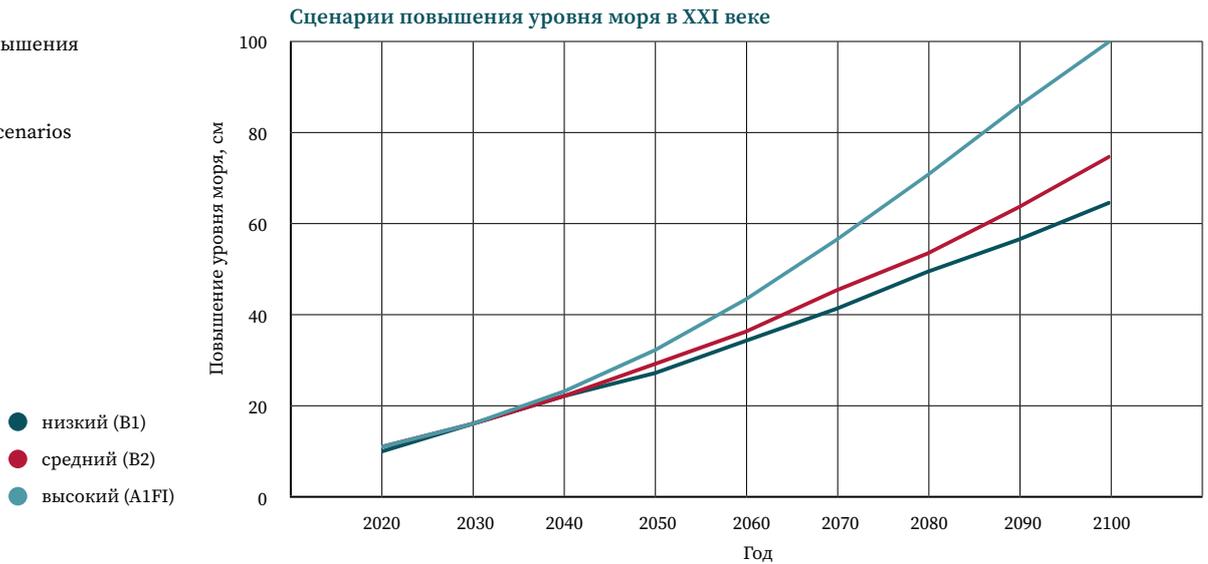
- 1) офшорное направление DEM, определенное как [восток], чтобы предоставить важную информацию об экологических факторах;
- 2) амплитуду прилива от 1 до 1,5 м [16], которая описывает изменение уровня воды с течением времени;
- 3) скорость эрозии болот около 19,7 м/год [17], которая дает данные о скорости эрозии болот, влияющей на процессы накопления;
- 4) темпы роста мангровых лесов на уровне 5 мм/год, показывающие адаптивные способности мангров к изменениям климата;

9 SLAMM 6.7 Technical Documentation / Warren Pinnacle Consulting, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM\\_6.7\\_Technical\\_Documentation.pdf](https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM_6.7_Technical_Documentation.pdf) (дата обращения: 12.10.2024).

10 Нгуен В.Т., Фам Т.Т.Н., Хуинь Т.Л.Х. Сценарии изменения климата (перевод с вьетнамского языка) / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Вьетнама, 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dcc.gov.vn/kien-thuc/1090/Kich-ban-bien-doi-khi-hau-cap-nhat-nam-2020.html> (дата обращения: 12.10.2024).

11 Climate change 2001: The scientific basis / J.T. Houghton (ed.). Cambridge University Press, 2001. 892 p.

**Рис. 5**   
 Сценарии повышения  
 уровня моря  
**Fig. 5**  
 Sea level rise scenarios



- 5) предварительная обработка высот установлена на [False], что указывает на отсутствие необходимости в предварительной обработке высот в процессе моделирования.

## 2.5 Принцип работы SLAMM

Реакция людей на потерю суши из-за повышения уровня моря является сложной проблемой с множеством влияющих факторов. Участки суши, которые были освоены (*англ. Developed Dry Land*) и которые не были освоены (*англ. Undeveloped Dry Land*), могут стать переходными солончаковыми болотами (*англ. Trans. Salt Marsh*), когда уровень опускается ниже определенной высоты в зависимости от условий затопления. В то время как в местах с высокой стоимостью земли владельцы могут продолжать строить дамбы и стены от наводнений, чтобы предотвратить дальнейшее затопление, в других регионах будут защищать только освоенную сушу или владельцы могут покинуть свою собственность, в результате произойдет переход к водно-болотным угодьям. Модель SLAMM способна смоделировать сценарии защиты, такие как «Не защищать» (*англ. Protect None*), «Защищать освоенную сушу» (*англ. Protect Developed Dry Land*) и «Защищать всю сушу» (*англ. Protect All Dry Land*), что позволяет анализировать влияние затопления на различные экосистемы<sup>12</sup>.

Внутренние пресноводные болота (*англ. Inland-Fresh Marsh*) могут затопляться и превращаться в приливные пресноводные болота, в то время как переходные солончаковые болота могут стать регулярно затопляемыми болотами (*англ. Regularly-Flooded Marsh*), когда уровень опускается ниже минимальной высоты. Водно-болотные угодья (*англ. Mangrove*) могут развиваться, если участок признан тропическим. Приливно-отливные отмели (*англ. Tidal Flat*) и скалистая приливно-отливная зона (*англ. Rocky Intertidal*) обычно превращаются в открытые воды эстуария (*англ. Estuarine Open Water*), когда уровень опускается ниже определенной высоты, в то время как открытый океан (*англ. Open Ocean*) не подлежит никаким изменениям<sup>12</sup>.

Для оценки точности модели SLAMM и ее применимости в последующие годы была использована карта водно-болотных угодий 2016 года в качестве основы для определения сценария изменений на 2022 год. Этот сценарий будет сопоставлен с картой водно-болотных угодий 2022 года с помощью метода

<sup>12</sup> SLAMM 6.7 Technical Documentation / Warren Pinnacle Consulting, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM\\_6.7\\_Technical\\_Documentation.pdf](https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM_6.7_Technical_Documentation.pdf) (дата обращения: 12.10.2024).

наложения, что позволит получить целостное представление об изменениях в водно-болотных угодьях за этот период [14] (с учетом того, что в течение шести лет изменения климата не оказали значительного влияния на водно-болотные угодья, и при игнорировании условий оседания).

Процесс предварительной обработки спутниковых снимков для получения карты водно-болотных угодий был выполнен с использованием программного обеспечения ArcGIS Pro, ArcMap 10.8 и Jupyter Notebook. В ходе этого процесса был рассчитан растр для цифровой модели высот, уклона и проведены такие этапы, как сглаживание, обрезка и преобразование системы координат, чтобы гарантировать, что все данные приведены к одной географической системе координат. В частности, процесс преобразования формата TIF в формат ASCII был осуществлен с помощью ArcMap 10.8 в сочетании с RStudio для обработки растра с одинаковым количеством и размером ячеек. После завершения этапа предварительной обработки сценарии были проанализированы и реализованы в версии SLAMM 6.7. Наконец, эти сценарии были статистически обработаны, оценены и представлены через программное обеспечение ArcGIS Pro и Microsoft Excel, что дало общее представление об изменениях в экосистеме водно-болотных угодий.

### 3 Результаты и обсуждение

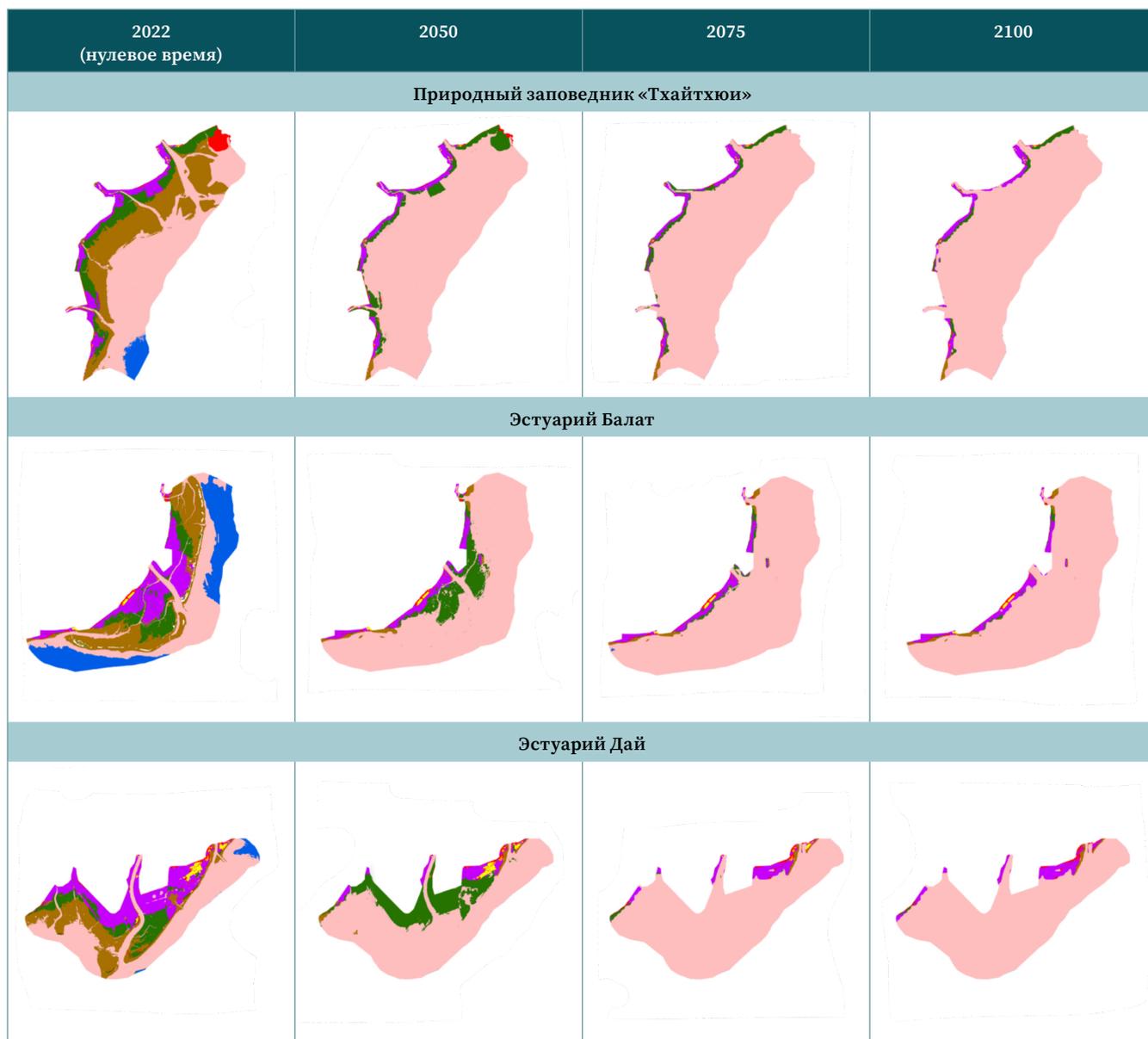
#### 3.1 Прогнозные результаты

На начальном этапе различные типы водно-болотных угодий, включая мангровые леса, прибрежные отмели и земли для аквакультуры, занимали большую площадь и подвергались минимальным изменениям. Прогнозируемый сценарий был установлен при условии отсутствия мер защиты (*англ.* Protect None), при этом все ячейки могли быть затоплены и преобразованы в другие типы экосистем в моделировании. В данном исследовании был выбран сценарий без защиты для наиболее точной оценки на основе самого пессимистичного сценария Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама, а именно сценария RCP8.5 (табл. 2). Результаты анализа показали, что общая тенденция изменений типов водно-болотных угодий трансформируется с повышением уровня моря, что явно выражается в изменениях использования земель по модели SLAMM от начального момента до конца века при сценарии SLR8.5 Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама в сочетании с симуляцией сценария Protect None (рис. 6).

**Таблица 2**   
Прогноз изменения площади различных типов водно-болотных угодий в дельте Красной реки по годам, га

**Table 2**  
Forecast of changes in the area of different types of the Red River Delta wetlands by year, hectares

Типы водно-болотных угодий по категории SLAMM	Природный заповедник «Тхайтхюу»				Эстуарий Балат				Эстуарий Дай			
	2022 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.	2022 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.	2022 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.
Освоенная суша	1088,38	407,26	226,84	185,75	241,26	206,47	198,31	198,31	445,95	236,51	240,68	240,68
Неосвоенная суша	46,42	46,42	40,91	40,91	119,33	89,14	84,31	84,31	371,90	285,98	62,75	1254,01
Внутренние пресноводные болота	3397,79	2100,63	1560,76	1606,34	4687,05	1587,61	1270,54	1270,54	5555,05	1056,38	452,72	0,00
Переходные солончаковые болота	0,40	0,50	0,30	0,23	12,55	0,27	0,22	0,22	0,03	0,03	0,03	0,03
Мангровые леса	4941,53	3496,92	1714,41	1059,78	2991,33	3453,43	510,98	190,56	2863,81	5080,99	127,84	47,12
Приливно-отливные отмели	13 811,63	384,45	251,75	254,79	6952,02	587,04	422,97	422,97	5194,22	364,00	191,03	191,03
Скалистая приливно-отливная зона	13,91	11,87	9,99	9,99	313,98	1,76	1,14	1,14	20,22	5,20	5,05	5,05
Открытые воды эстуария	22 488,00	41 070,19	43 713,54	44 360,53	8721,48	25 502,89	28 940,11	29 260,54	11 027,17	18 908,01	24 856,99	24 199,17
Открытый океан	1730,26	0,00	0,00	0,00	7389,61	0,00	0,00	0,00	458,75	0,00	0,00	0,00



**Рис. 6**  
 Результаты прогнозирования SLAMM в дельте Красной реки с 2022 по 2100 г. по сценарию RCP8.5 с повышением уровня моря на 1 м

**Fig. 6**  
 Results of SLAMM forecasting for the Red River Delta from 2022 to 2100 under the RCP8.5 scenario with a 1-meter sea-level rise

- Условные обозначения**
- мангровые заросли
  - постоянные морские мелководья
  - соляное болото
  - каменистые морские побережья
  - приливные отмели
  - сезонные сельскохозяйственные угодья
  - аквакультуры
  - не водно-болотные угодья
  - постоянные воды эстуариев

### 3.2 Анализ изменений

Таблица данных ясно показывает изменение площади различных типов водно-болотных угодий в процентах на трех исследуемых участках: в природном заповеднике «Тхайтхю», устье реки Балат и устье реки Дай с 2022 по 2100 год, отражая влияние изменения климата и подъема уровня моря. Прежде всего, рассмотрим площадь освоенной суши. В природном заповеднике «Тхайтхю» наблюдается ее резкое снижение с 1088,38 га в 2022 году до 185,75 га в 2100 году (на 83,0 %). В устье реки Балат она сокращается с 241,26 до 198,31 га (снижение на 17,8 %), в устье реки Дай — с 445,95 до 240,68 га (снижение на 46,0 %). Что касается неосвоенной суши, в природном заповеднике «Тхайтхю» она сначала

сохраняет стабильный уровень, но затем ее площадь уменьшается с 46,42 га в 2022 г. до 40,91 га в 2100 г. (снижение на 11,1 %). В устье реки Балат площадь таких земель сокращается с 119,33 до 84,31 га (снижение на 29,4 %), в устье реки Дай они демонстрируют резкий рост: с 62,75 до 1254,01 га (увеличение на 1998,4 %).

Площадь внутренних пресноводных болот в природном заповеднике «Тхайтхюи» сокращается с 3397,79 до 1606,34 га (снижение на 52,8 %), в устье реки Балат — с 4687,05 до 1270,54 га (снижение на 72,8 %). Особенно примечательно, что устье реки Дай теряет всю площадь внутренних пресноводных болот — с 5555,05 до 0 га к 2100 году (снижение на 100,0 %). Площадь переходных солончаковых болот остается очень маленькой и не изменяется существенно в трех регионах. Что касается мангровых лесов, в природном заповеднике «Тхайтхюи» наблюдается их резкое сокращение с 4941,53 до 1059,78 га (на 78,6 %), что указывает на серьезное воздействие подъема уровня моря на мангровые экосистемы. В устье реки Балат площадь мангровых лесов сокращается с 2991,33 до 190,56 га (снижение на 93,6 %). Напротив, в устье реки Дай показан сильный рост мангровых лесов с 2863,81 в 2022 году до 5080,99 га в 2050 году, но их площадь резко сокращается до 47,12 га к 2100 году (снижение на 98,4 %). Изменение площади приливно-отливных отмелей также заслуживает внимания. Заметно их отчетливое сокращение в природном заповеднике «Тхайтхюи» — с 13811,63 до 254,79 га (снижение на 98,2 %), в устье реки Балат — с 6952,02 до 422,97 га (на 93,9 %), в устье реки Дай — с 5194,22 до 191,03 га (на 96,3 %). Это свидетельствует о постепенной потере прибрежных отмелей под воздействием подъема уровня моря.

Площадь скалистой приливно-отливной зоны также сокращается в трех регионах: в природном заповеднике «Тхайтхюи» — с 13,91 до 9,99 га (снижение на 28,1 %), в устье реки Балат — с 313,98 до 1,14 га (на 99,6 %), в устье реки Дай — с 20,22 до 5,05 га (на 75,0 %). Что касается открытых вод эстуария, в природном заповеднике «Тхайтхюи» наблюдается увеличение их площади с 22 488,00 до 44 360,53 га (увеличение на 97,1 %), что отражает увеличение площади водной поверхности, когда затопляются другие водно-болотные угодья. Устья рек Балат и Дай демонстрируют значительное увеличение площади открытых вод эстуария: с 8721,48 до 29 260,54 га (увеличение на 234,1 %) и с 11 027,17 до 24 199,17 га (на 119,3 %) соответственно. Наконец, площадь открытого океана изменяется только в природном заповеднике «Тхайтхюи» и в устье реки Балат, в то время как в устье реки Дай этой площади не наблюдается в 2075 и 2100 годах.

## 4 Выводы

Модель SLAMM четко продемонстрировала серьезное воздействие повышения уровня моря на экосистемы водно-болотных угодий в районе дельты Красной реки, особенно в таких ключевых зонах, как природный заповедник «Тхайтхюи», устья рек Балат и Дай. Изменения площади водно-болотных угодий в названных природных заповедниках, играющих важнейшую роль в охране окружающей среды и поддержании биологического разнообразия, указывают на большие проблемы в сохранении и восстановлении этих важных экосистем.

Так, природный заповедник «Тхайтхюи», являющийся одной из ключевых зон для сохранения флоры и фауны, столкнется с резким сокращением площади освоенной суши, в частности сельскохозяйственных и жилых земель. Повышение уровня моря в этом районе может привести к утрате ценных природных ресурсов и нанести ущерб природным средам. Площадь водно-болотных угодий, таких как мангровые леса и внутренние болота, которые играют важную роль в защите побережья и предоставлении экосистемных услуг, значительно уменьшится.

В устье рек Балат и Дай повышение уровня моря также приведет к существенным изменениям площади водно-болотных угодий, что превратит эти территории в открытые водоемы. Данные изменения могут повлиять на экологическую

функцию этих районов. Несмотря на то что изменения площади водно-болотных угодий варьируются от региона к региону, переход от экосистем водно-болотных угодий к другим формам использования земель неизбежен под воздействием повышения уровня моря.

Увеличение площади открытых водоемов в устье рек и на побережье отражает важный тренд в трансформации использования земель, вызванный повышением уровня моря. Это может привести к потере важных экосистемных услуг, таких как рыболовство и регулирование климата. Данная проблема будет особенно актуальной в тех районах, которые не будут эффективно защищены, как, например, природный заповедник «Тхайтхюи», устья рек Балат и Дай. Результаты исследования показывают: если своевременно не принять меры защиты, площадь водно-болотных угодий в этих районах продолжит сокращаться, что приведет к невосполнимым потерям экосистем и природных ресурсов. Для смягчения этих воздействий крайне необходимы меры защиты и адаптации, в том числе строительство инфраструктуры для предотвращения эрозии, защита мангровых лесов и повышение осведомленности общественности. Регулярные исследования и мониторинг помогут своевременно скорректировать стратегии охраны в условиях продолжающегося повышения уровня моря.

Кроме того, результаты исследования подчеркивают необходимость прогнозирования будущих изменений уровня моря, особенно с учетом таких сценариев, как RCP8.5, для разработки стратегий охраны окружающей среды и устойчивого развития прибрежных территорий. Правительствам и заинтересованным организациям необходимо активно внедрять долгосрочные защитные меры, а также усиливать международное сотрудничество для реагирования на вызовы, связанные с повышением уровня моря и глобальными изменениями климата.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Василию Александровичу Малинникову за всестороннюю поддержку и ценные рекомендации, которые во многом способствовали проведению данного исследования, а также за методологические советы, предложения по корректировке структуры работы и внимательное отношение к деталям, что оказало значительное влияние на качество полученных результатов. Высокий профессионализм Василия Александровича, его научная компетентность и готовность к обсуждению сложных вопросов стали важными факторами успешного завершения исследования.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Đoàn T.T.H., Phạm T.T., Trần T.P. Suy thoái hệ sinh thái toàn cầu và giải pháp phục hồi hệ sinh thái cho Việt Nam // Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu. 2022. Số. 22. Tr. 17–25. DOI:10.55659/2525-2496/22.71057.
2. Đạt T.Q., Likitdecharote K., Trung N.H. Mô phỏng xâm nhập mặn Đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn // Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ. 2012. Số. 21. Tr. 141–150.
3. Nguyễn Đ.Đ., Đoàn T.T.H. Giải pháp phục hồi hệ sinh thái và đa dạng sinh học cho Việt Nam // Nghiên cứu Địa lý nhân văn. 2021. Số. 4. Tr. 81–90.
4. Clough J., Polaczyk A., Propato M. Modeling the potential effects of sea-level rise on the coast of New York: Integrating mechanistic accretion and stochastic uncertainty // Environmental Modelling & Software. 2016. Vol. 84. P. 349–362. DOI:10.1016/j.envsoft.2016.06.023.
5. Akumu C.E., Pathirana S., Baban S., et al. Examining the potential impacts of sea level rise on coastal wetlands in north-eastern NSW, Australia // Journal of Coastal Conservation. 2011. Vol. 15. P. 15–22. DOI:10.1007/s11852-010-0114-3.
6. Payo A., Mukhopadhyay A., Hazra S., et al. Projected changes in area of the Sundarban mangrove forest in Bangladesh due to SLR by 2100 // Climatic Change. 2016. Vol. 139. P. 279–291. DOI:10.1007/s10584-016-1769-z.
7. Cole Ekberg M.L., Raposa K.B., Ferguson W.S., et al. Development and application of a method to identify salt marsh vulnerability to sea level rise // Estuaries and Coasts. 2017. Vol. 40. P. 694–710. DOI:10.1007/s12237-017-0219-0.
8. Fernandez-Nunez M., Burningham H., Díaz-Cuevas P., et al. Evaluating the response of Mediterranean-Atlantic salt marshes to sea-level rise // Resources. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 50. DOI:10.3390/resources8010050.

9. Dang A.T., Reid M., Kumar L. Assessing potential impacts of sea level rise on mangrove ecosystems in the Mekong Delta, Vietnam // *Regional Environmental Change*. 2022. Vol. 22. No. 2. P. 70. DOI:10.1007/s10113-022-01925-z.
10. Cooper H., Zhang C. Vulnerability Analysis of Coastal Everglades to Sea Level Rise Using SLAMM // *Multi-Sensor System Applications in the Everglades Ecosystem*. Boca Raton: CRC Press, 2020. P. 259–272.
11. Familkhalili R., Davis J., Currin C.A., et al. Quantifying the benefits of wetland restoration under projected sea level rise // *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10. P. 1–15. DOI:10.3389/fmars.2023.1187276.
12. Quoc L.H. Tiếp cận địa lý trong phân vùng chức năng không gian ven biển huyện Hải Hậu-Nghĩa Hưng, tỉnh Nam Định // *Tạp chí khoa học Tài nguyên và Môi trường*. 2017. Số. 15. Tr. 14–25.
13. Wu W., Yeager K.M., Peterson M.S., et al. Neutral models as a way to evaluate the Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM) // *Ecological Modelling*. 2015. Vol. 303. P. 55–69. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.02.008.
14. Куен Д.Т., Малинников В.А. Классификация устьевых и прибрежных водно-болотных угодий по снимкам Planet NICFI на основе сверточных нейронных сетей и трансферного обучения // *Геодезия и картография*. 2024. № 6. С. 31–42. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42.
15. Krauss K.W., McKee K.L., Lovelock C.E., et al. How mangrove forests adjust to rising sea level // *New Phytologist*. 2014. Vol. 202. No. 1. P. 19–34. DOI:10.1111/nph.12605.
16. Hai H.Đ., Trong H.G., Tuan P.V., et al. Nghiên cứu phương pháp quy chuyển độ cao giữa hải đồ và bản đồ địa hình biển dựa trên thủy triều tại khu vực Vịnh Bắc Bộ // *Tạp chí khí tượng thủy văn*. 2023. Số. 752. Tr. 51–60.
17. Saintilan N., Khan N.S., Ashe E., et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise // *Science*. 2020. Vol. 368. P. 1118–1121. DOI:10.1126/science.aba2656.

**АВТОР Куен Динь Туен**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра космического мониторинга и экологии, картографический факультет  
 0000-0002-6577-0087

Поступила 17.11.2024. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Prediction of changes in coastal wetland types due to sea-level rise using the SLAMM model

Quyên Dinh Tuyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 quyendinh TUYEN97@mail.ru

**CITATION** Quyên Dinh Tuyen. Prediction of changes in coastal wetland types due to sea-level rise using the SLAMM model. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 44–60. DOI:10.30533/GiA-2025-020.

**KEYWORDS** coastal wetlands, SLAMM, sea-level rise, climate change, Red River Delta, prediction, Vietnam

**ABSTRACT** Wetland ecosystems are essential for maintaining ecological balance by fulfilling functions such as water filtration, carbon storage, and flood protection. However, climate change and sea level rise threaten these ecosystems, particularly in coastal regions. This research examines the impact of sea level rise on wetland ecosystems in the interprovincial biosphere reserve of the Red River Delta (Vietnam) using the SLAMM (Sea Level Affecting Marshes Model). To simulate changes in the ecosystems, wetland maps classified based on PlanetScope satellite imagery (2016–2022) with a resolution of 4.77 meters and featuring 9 land categories were used. These maps, processed using deep learning techniques, were converted into the SLAMM format. The scenario applied in this research is based on RCP8.5, developed by Vietnam's Ministry of Natural Resources and Environment, which forecasts a sea level rise of 1 meter by 2100. According to the developed scenarios, sea level rise will cause significant changes in the distribution of wetland ecosystems, especially mangroves and tidal flats. These results are vital for designing adaptive measures and sustainable management strategies for coastal ecosystems.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The author expresses deep gratitude to his research advisor, V.A. Malinnikov, for his comprehensive support and valuable recommendations that greatly contributed to the conduct of this study. Special thanks are extended for his methodological guidance, suggestions for improving the structure of the work, and attentive consideration of details, which significantly influenced the quality of the results obtained. Vasilij Alexandrovich's high professionalism, scientific expertise, and willingness to discuss complex issues were key factors in the successful completion of this research.

REFERENCES

1. Đoàn TTH, Phạm TT, Trần TP. Suy thoái hệ sinh thái toàn cầu và giải pháp phục hồi hệ sinh thái cho Việt Nam [Global ecosystem degradation and solutions for ecosystem restoration for Vietnam]. *Journal of Climate Change science*. 2022;22: 17–25. (In Vietnamese). DOI:10.55659/2525-2496/22.71057.
2. Đạt TQ, Likitdecharote K, Trung NH. Mô phỏng xâm nhập mặn Đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn [Simulation of saltwater intrusion in the Mekong Delta under the impact of sea level rise and upstream flow reduction]. *Can Tho University Journal of Science*. 2012. Số. 21. Tr. 141–150. (In Vietnamese).
3. Nguyễn ĐĐ, Đoàn TTH. Giải pháp phục hồi hệ sinh thái và đa dạng sinh học cho Việt Nam [Solutions to ecosystem restoration and biodiversity for Vietnam]. *Human Geography Review*. 2021;4: 81–90. (In Vietnamese).
4. Clough J, Polaczyk A, Propato M. Modeling the potential effects of sea-level rise on the coast of New York: Integrating mechanistic accretion and stochastic uncertainty. *Environmental Modelling & Software*. 2016;84: 349–362. DOI:10.1016/j.envsoft.2016.06.023.
5. Akumu CE, Pathirana S, Baban S, et al. Examining the potential impacts of sea level rise on coastal wetlands in north-eastern NSW, Australia. *Journal of Coastal Conservation*. 2011;15: 15–22. DOI:10.1007/s11852-010-0114-3.
6. Payo A, Mukhopadhyay A, Hazra S, et al. Projected changes in area of the Sundarban mangrove forest in Bangladesh due to SLR by 2100. *Climatic Change*. 2016;139: 279–291. DOI:10.1007/s10584-016-1769-z.
7. Cole Ekberg ML, Raposa KB, Ferguson WS, et al. Development and application of a method to identify salt marsh vulnerability to sea level rise. *Estuaries and Coasts*. 2017;40: 694–710. DOI:10.1007/s12237-017-0219-0.
8. Fernandez-Nunez M, Burningham H, Díaz-Cuevas P, et al. Evaluating the response of Mediterranean-Atlantic salt marshes to sea-level rise. *Resources*. 2019;8(1): 50. DOI:10.3390/resources8010050.
9. Dang AT, Reid M, Kumar L. Assessing potential impacts of sea level rise on mangrove ecosystems in the Mekong Delta, Vietnam. *Regional Environmental Change*. 2022;22(2): 70. DOI:10.1007/s10113-022-01925-z.
10. Cooper H, Zhang C. Vulnerability Analysis of Coastal Everglades to Sea Level Rise Using SLAMM. *Multi-Sensor System Applications in the Everglades Ecosystem*. Boca Raton: CRC Press; 2020: 259–272.
11. Familkhalili R, Davis J, Currin CA, et al. Quantifying the benefits of wetland restoration under projected sea level rise. *Frontiers in Marine Science*. 2023;10: 1–15. DOI:10.3389/fmars.2023.1187276.
12. Quốc LH. Tiếp cận địa lý trong phân vùng chức năng không gian ven biển huyện Hải Hậu-Nghĩa Hưng, tỉnh Nam Định [Geographical access in functional spatial zoning in coastal districts of Hai Hau and Nghia Hung – Nam Dinh province]. *Science resources and environment*. 2017;15: 14–25. (In Vietnamese).
13. Wu W, Yeager KM, Peterson MS, et al. Neutral models as a way to evaluate the Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM). *Ecological Modelling*. 2015;303: 55–69. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.02.008.
14. Quyen DT, Malinnikov VA. Klassifikacija ust'evyh i pribrezhnyh vodno-bolotnyh ugodij po snimkam Planet NICFI na osnove svertochnyh nejronnyh setej i transfernogo obuchenija [Classification of estuaries and coastal wetlands from Planet-NICFI imagery based on convolutional neural networks and transfer training]. *Geodesy and Cartography*. 2024;6: 31–42. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42.
15. Krauss KW, McKee KL, Lovelock CE, et al. How mangrove forests adjust to rising sea level. *New Phytologist*. 2014;202: 19–34. DOI:10.1111/nph.12605.
16. Hải ND, Trọng NG, Tuấn PV, et al. Nghiên cứu phương pháp chuyển đổi độ cao giữa hải đồ và bản đồ địa hình đáy biển dựa trên dữ liệu thủy triều ở Vịnh Bắc Bộ [Method for vertical datum conversion between nautical charts and topographic maps based on tidal data in the Gulf of Tonkin]. *Scientific and Technical Hydro-Meteorological Journal*. 2023;752: 51–60.
17. Saintilan N, Khan NS, Ashe E, et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise. *Science*. 2020;368: 1118–1121. DOI:10.1126/science.aba2656.

**AUTHOR** **Quyen Dinh Tuyen**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Space Monitoring and Ecology, Faculty of Cartography

 0000-0002-6577-0087

**Submitted: November 17, 2024. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.**



# Разработка программного модуля для проведения оценки пространственного развития земель городской агломерации

О.В. Богданова<sup>1</sup>, К.Р. Меркурьева<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия  
✉ k\_r\_merkurieva@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Богданова О.В., Меркурьева К.Р. Разработка программного модуля для проведения оценки пространственного развития земель городской агломерации // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 61–73. DOI:10.30533/GiA-2025-021.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** пространственное развитие территории, программный модуль QGIS, земли Тюменской городской агломерации, автоматизированный расчет, зонирование территории, территориальные показатели, итоговый интегральный индекс агломерации

**АННОТАЦИЯ** Статья посвящена разработке автоматизированного программного модуля для оценки пространственного развития земель городских агломераций. В тексте представлена краткая характеристика программного обеспечения QGIS, применяемого в качестве платформы для разработанного программного модуля, также выполнен обзор языка программирования и библиотек, используемых для разработки программного модуля. В статье описываются инструментарий и функциональные возможности разработанного плагина, приводятся примеры расчетов системы. Авторы предлагают производить оценку пространственного развития исследуемой территории с помощью расчета четырех интегральных индексов. Предложенный автоматизированный программный модуль проводит расчеты по выбранным показателям, учитывая развитие территориальных единиц в составе агломерации по социально-экономическим и территориальным показателям, на основе которых с помощью разработанной шкалы для интерпретации результатов выводит пользователю карту-схему зонирования выбранной территории. Функциональность и работоспособность разработанного программного модуля протестированы на примере оценки пространственного развития земель Тюменской городской агломерации. Представленная разработка позволяет проводить автоматизированную обработку загруженных групп показателей развития и отображение актуальных результатов оценки пространственного развития земель городской агломерации на текущий момент и в динамике с целью проведения комплексного анализа ситуации и последующего

принятия конструктивных управленческих решений, а также может применяться для более эффективной разработки стратегических и программных документов развития муниципальных образований.

## 1 Введение

В современных условиях агрессивного развития территории остро стоит вопрос рационального, безопасного и эффективного использования городских земель и прилегающих к ним районов. Успех и эффективность пространственного развития зависят от точности, правильности и быстроты принимаемых управленческих решений. Под пространственным развитием следует понимать процесс социально-экономического и территориального развития, который предполагает использование ресурсов и развитие отношений между территориями с целью повышения уровня жизни населения и обеспечения устойчивого развития. На сегодняшний день большую значимость имеет стратегическое управление пространственным развитием городских агломераций и системой оценки таких земель. В первую очередь это обеспечивается автоматизацией процессов оценки территорий. Автоматизация процессов оценки территории вызвана необходимостью сократить затраты времени на требуемые расчеты используемых показателей, качественно или количественно характеризующих объект исследования, а также отслеживать динамичность протекающих изменений, способных оказывать влияние на текущее развитие территории, и реализуема за счет разработки специализированного программного обеспечения на основе существующих геоинформационных систем.

Цель работы состоит в разработке автоматизированного программного модуля для оценки пространственного развития земель городских агломераций с выводом данных в виде карт-схем зонирования территории. Процесс оценки пространственного развития территории состоит из подготовительного, основного и заключительного этапов. По результатам оценки формируется итоговый индекс, характеризующий уровень пространственного развития исследуемой территории. Определение уровня развития позволит реализовать приоритеты пространственного развития путем удовлетворения выявленных потребностей территории, а также обеспечения взаимосвязки отраслевых приоритетов через документы территориального планирования. Кроме того, проведение оценки даст возможность осуществить мониторинг пространственного развития на основе репрезентативных показателей, качество и полнота анализа которых способствуют созданию и развитию цифровых автоматизированных решений управления пространственным развитием территории.

## 2 Материалы и методы

Вопросы пространственного развития территории рассматриваются в работах многих авторов. Так, в трудах А.П. Карпика особое внимание уделяется проблемам, подходам и принципам организации рационального использования земель в системе пространственного развития, в связи с чем предлагается критериальная оценка эффективности освоения территории с апробацией на формирующихся агломерациях. Кроме того, ученый совместно с В.Б. Жарниковым и Ю.С. Ларионовым приводит ряд технологических решений, оказывающих влияние на устойчивость пространственного развития в части создания интеллектуальных информационных метрических моделей территорий [1–2]. В работах А.П. Сизова и Е.Г. Черных обсуждаются наиболее значимые критерии для формирования оценочной модели текущих и прогнозируемых показателей пространственного развития, отобранных по результатам многоуровневой фильтрации.

Авторами также разработан программный комплекс для систематизации и обработки большого объема пространственных данных в целях расчета и анализа показателей пространственного развития сложноустроенного субъекта [3–6]. В.Л. Глазычев декларирует необходимость развития института пространственного развития территории через создание иерархичной системы, охватывающей муниципальные и региональные территории, для достижения эффективности пространственного развития страны в целом<sup>1</sup>. В.Н. Лексин отмечает особую роль формирования агломераций при пространственном развитии территории, подчеркивает, что следует стимулировать создание новых агломерационных связей и укреплять уже существующие<sup>2</sup>. Г.М. Лаппо в своих работах рассматривает проблему перспективного развития городов с целью дальнейшего совершенствования региональной сети, в связи с чем выделяет факторы, условия и основные направления для развития региональной сети городских поселений [7–8]. Н.Р. Камынина обращает особое внимание на значимую роль документов территориального развития для реализации процесса развития территории и его адаптации для местных нужд [9], при этом под термином «развитие территории» понимаются пространственное разрастание территории, увеличение миграционных потоков, приводящие к агломерированию.

Автоматизация оценки исследуемых территорий с точки зрения их развития освещается во многих работах. Например, Л.С. Тараненко, С.В. Тараненко предлагают разработку базы данных с целью формирования комплексной оценки сценариев социально-экономического и пространственного развития территории [10]; В.В. Бойко, А.С. Жеведь пишут о применении пространственного анализа при проведении социально-экономической оценки территории текущего и прогнозируемого периода на основе отобранных различных показателей. Авторы представляют математическую модель, позволяющую учитывать факторы, оказывающие значительное влияние на развитие исследуемой территории [11]. С.А. Атаманов в своем исследовании предлагает автоматизированную программу для размещения «объектов внимания» — неких территориальных объектов, требующих принятия определенного управленческого решения. Такая программа основана на разработанной методике, учитывающей ряд характеристик объекта, которые влияют на результаты поиска места его размещения [12]. М.О. Хитрин предлагает разработку адаптивного геопортала, в структуре которого заложены возможности по визуализации картографической информации, формирование семантических запросов как для фильтрации данных, так и для получения информации о конкретном выделенном объекте; кроме того, реализуются функции по геообработке и геопространственному анализу для решения таких задач, как выявление некорректности постановки объектов на кадастровый учет, определение обрабатываемой и необрабатываемой земли на основе данных дистанционного зондирования Земли [13]. Н.И. Бурмакина и ее соавторы представляют научные разработки в области земельно-имущественных отношений для обеспечения комплексного пространственного развития на основе совершенствования территориального планирования, землеустройства и кадастров, обосновывают роль кадастра недвижимости, землеустройства и территориального планирования в качестве фундаментальной основы пространственного развития государства [14].

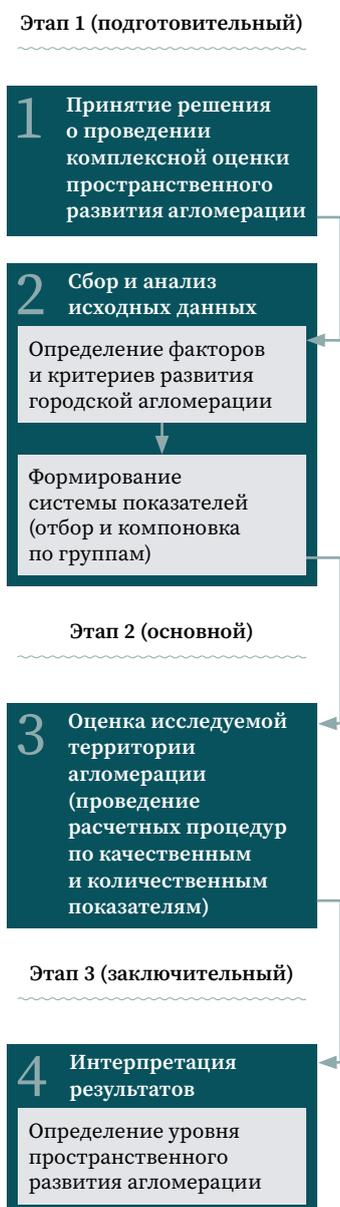
Результаты анализа научной литературы свидетельствуют о высокой необходимости автоматизации процессов обработки данных и последующей оценки пространственных данных. Рассмотренные методы и инструменты опираются в основном на ручную обработку и интерпретацию полученных данных, тем самым характеризуются высокой трудоемкостью и субъективностью результатов. Большая часть научных источников демонстрирует неэффективность традиционных подходов в работе с большими объемами современных данных,

1 Глазычев В.Л., Щедровицкий П.Г. Россия: принципы пространственного развития. М.: ЦСИ ПФО, 2004. 86 с.

2 Лексин В.Н. Городские агломерации и система расселения: надежды и опасения // Мир городов. 2011. № 2. С. 39–44.

**Рис. 1**   
Технологическая схема оценки уровня пространственного развития городской агломерации

**Fig. 1**  
Technological scheme for assessing the level of spatial development of an urban agglomeration



что приводит к потере времени и задержкам в принятии решений, снижая эффективность планирования. Для преодоления выявленных ограничений и повышения объективности оценки пространственного развития территории необходим переход к автоматизированным методам, который реализуется через разработку специализированного программного обеспечения.

Таким образом, с учетом потребности в эффективных и масштабируемых инструментах анализа пространственных данных для разработки программного модуля оценки пространственного развития земель городских агломераций был выбран язык программирования Python. К основным преимуществам выбранного языка программирования следует отнести: принадлежность языка к классу высокоуровневых, автоматизацию процессов управления памятью, строгую типизацию, обладающую определенной динамикой. Кроме того, применяя данный язык программирования, пользователь обеспечивает свою разработку повышенной производительностью, формирует быстрое считывание кодировок, что влияет на их качество, а также предоставляет возможность обмена разрабатываемым программным обеспечением в виде переноса на аналогичные системы, использующие тот же язык программирования. Важной особенностью данного языка является его универсальность, за счет его совместимости в него можно внедрять различные библиотеки и фреймворки [10]. Для разработки графического интерфейса на языке Python использовалась библиотека PyQt5. В свою очередь, для работы с данными на языке Python применялась библиотека Pandas.

Разработанное программное обеспечение базируется на QGIS — геоинформационной системе (ГИС) с открытым кодом. Таким образом, она является бесплатной, т. е. свободно распространяемой, программой, скачать которую можно с официального сайта. Кроме того, система работает на большом количестве платформ (например, Unix, Windows и macOS), что является ее преимуществом. Она быстра в работе, обладает простым интерфейсом и понятна в использовании [10].

Для получения исправно функционирующего программного модуля в разработке применялись данные из открытых источников, сформированные в базу данных показателей модуля.

### 3 Результаты и обсуждение

Процесс оценки уровня пространственного развития земель городской агломерации автоматизирован путем разработки программного модуля в виде плагина «Оценка уровня пространственного развития агломерации». Процессы расчета и получения результирующих данных основаны на разработанной методике оценки пространственного развития городской агломерации (рис. 1).

Разработанный программный модуль внедряется в ГИС посредством установки плагина. В качестве топографической основы используется фрагмент карты Тюменской области с оцифрованными границами муниципальных образований, в числе которых городской округ город Тюмень, городской округ город Ялуторовск, Тюменский муниципальный район, Нижнетавдинский муниципальный район, Исетский муниципальный район, Ярковский муниципальный район, Ялуторовский муниципальный район (далее — земли городской агломерации). Территория выбрана как потенциально приемлемая для развития земель городской агломерации. Совокупность оцифрованных границ муниципальных образований создает границу земель Тюменской агломерации в виде отдельного тематического слоя.

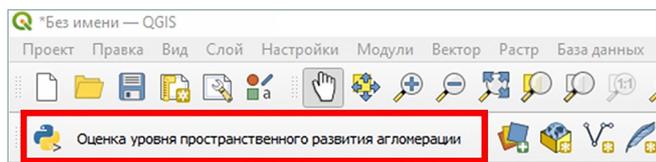
В плагин загружена атрибутивная база данных показателей пространственного развития территории, состоящая из группы социально-экономических показателей и территориальных показателей. На основе загруженных данных разработанное программное обеспечение осуществляет расчет основных

**Рис. 2** 

Фрагмент панели инструментов с клавишей для вызова плагина «Оценка уровня пространственного развития агломерации»

**Fig. 2**

A fragment of the toolbar with a key for calling the plugin “Assessment of the level of spatial development of an agglomeration”

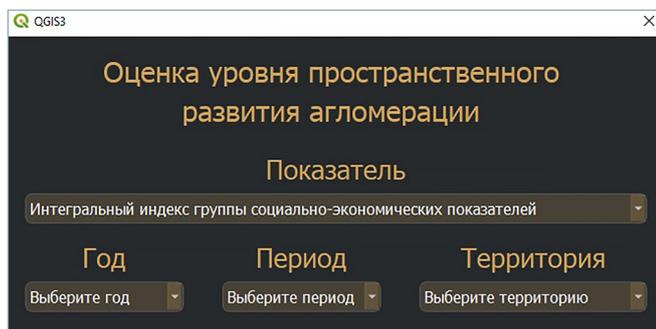


**Рис. 3** 

Панель управления плагином «Оценка уровня пространственного развития агломерации»

**Fig. 3**

Control panel of the plugin “Assessment of the level of spatial development of the agglomeration”



индексов, сводящихся в итоговый индекс, по которому определяется уровень пространственного развития агломерации.

Вызов плагина для оценки уровня пространственного развития агломерации осуществляется через основную панель инструментов QGIS (рис. 2).

Панель управления плагином представлена простым и понятным для пользователя интерфейсом. Для заполнения предложено четыре поля: «Показатель», «Год», «Период» и «Территория» (рис. 3).

В функциональные возможности плагина заложена оценка земель в границах всей агломерации, а также входящих в состав городской агломерации земель муниципальных образований по отдельности. Оценка возможна по четырем индексам, выбор которых осуществляется путем активации поля «Показатель»:

- интегральный индекс группы социально-экономических показателей;
- интегральный индекс группы территориальных показателей;
- итоговый интегральный индекс муниципальных образований;
- итоговый интегральный индекс агломерации.

При помощи заполнения граф «Год» и «Период» пользователь может получить информацию о показателях пространственного развития для земель всей агломерации или ее отдельных частей в конкретный момент времени либо за 5 лет.

По результатам заполнения соответствующих полей диалогового окна плагина программный модуль выполняет соответствующие расчеты и выводит на экран пользователя картографическое изображение исследуемой территории, разграниченное в соответствии с разработанной цветовой шкалой.

В алгоритм плагина закладываются математические формулы, на основе которых производятся расчеты нормированных показателей, необходимых для оценки пространственного развития (1), (2). Затем с применением весовых коэффициентов определяется итоговый показатель для каждой группы показателей (3), после этого все комбинируется в итоговый интегральный индекс для каждого муниципального образования, входящего в агломерацию (4). Суммарное значение таких индексов составляет итоговый интегральный индекс для оценки пространственного развития территории.

**1** 

$$НП_n^j = \frac{p_{max} - p_n}{p_{max} - p_{min}},$$

**2** 

$$НП_n^j = \frac{p_n - p_{min}}{p_{max} - p_{min}},$$

где  $НП_n^j$  — нормированный показатель по каждому показателю  $n$  группы факторов каждого муниципального образования  $j$  в составе агломерации;

$p_n$  — значение каждого показателя по выделенным группам  $n$ ;

$p_{min}, p_{max}$  — минимальные и максимальные значения по каждому показателю группы  $n$ .

**3** 

$$ИП_p^j = НП_n^j \times k_i,$$

где  $ИП_p^j$  — итоговый показатель группы показателей для муниципального образования  $j$  в составе агломерации;

$НП_n^j$  — нормированный показатель по каждому показателю  $n$  группы факторов каждого муниципального образования  $j$  в составе агломерации;

$k_i$  — коэффициент значимости показателя.

$$III^j = I_p^j + I_z^j,$$

где  $III^j$  – итоговый интегральный индекс муниципального образования  $j$  в составе агломерации;

$I_p^j$  – интегральный индекс социально-экономической группы показателей;

$I_z^j$  – интегральный индекс территориальной группы показателей.

Используя представленную шкалу, пользователь способен определить диапазон цифровых значений выбранного индекса и с помощью табл. 1 и 2 интерпретировать уровень пространственного развития выбранной территории.

**Таблица 1**

Шкала интерпретации цифровых диапазонов индексов социально-экономического и территориального развития

**Table 1**

Interpretation scale of digital ranges of indices of socio-economic and territorial development

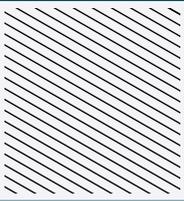
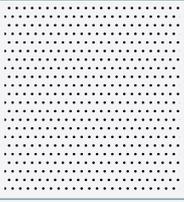
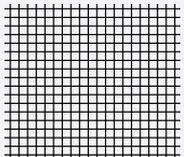
		Диапазон значений интегрального индекса группы показателей	Уровень показателей	Состояние показателей
Уровень развития территории	Развивающаяся	0–0,058	Абсолютно низкий	Кризисное
		0,059–0,10	Низкий	Депрессивное
		0,11–0,32	Средний	Стабильное
		0,33–0,48	Уровень экспансии (подъема)	Высокие значения
		0,49–0,74	Высокий	Устойчиво высокое
	Развитая	0,75–0,81	Абсолютно низкий	Кризисное
		0,82–0,86	Низкий	Депрессивное
		0,87–1,07	Средний	Стабильное
		1,08–1,23	Уровень экспансии (подъема)	Высокие значения
		1,24–1,48	Высокий	Устойчиво высокое
	Высокоразвитая	1,49–1,57	Абсолютно низкий	Кризисное
		1,58–1,61	Низкий	Депрессивное
		1,62–1,74	Средний	Стабильное
		1,75–1,80	Уровень экспансии (подъема)	Высокие значения
		1,81–2	Высокий	Устойчиво высокое

**Таблица 2**

Шкала интерпретации цифровых диапазонов индекса пространственного развития агломерации

**Table 2**

Interpretation scale of digital ranges of the index of spatial development of agglomeration

Значение итогового интегрального индекса агломерации $III_{agl}$	Положение агломерации согласно уровню пространственного развития	Характеристика
 0–0,74	Развивающаяся	Происходит стадия формирования агломерации (определения ядра и периферии), когда создаются общие рынки, налаживаются связи, при этом наблюдается нестабильность пространственного развития территории
 0,75–1,48	Развитая	Завершение стадии формирования агломерации и ее преобразование в точку роста, при этом устанавливается взаимосвязь социально-экономических и территориальных показателей, уровень пространственного развития территории повышается
 1,49–2	Высокоразвитая	Отражение статуса агломерации как ключевого элемента пространственного развития, что ведет к росту общих рынков и возможным проявлениям межагломерационных связей

**Рис. 4**

Карта-схема зонирования территории Тюменской агломерации по результатам расчета интегрального индекса группы социально-экономических показателей за 2016 г.

**Fig. 4**

Map-scheme of zoning of the territory of the Tyumen agglomeration based on the results of calculating the Integral Index of the group of socio-economic indicators for 2016



**Условные обозначения**

Интегральный индекс группы социально-экономических показателей

0–0,058 (абсолютно низкий уровень)

0,059–0,10 (низкий уровень)

**Рис. 5**

Карта-схема зонирования территории Тюменской агломерации по результатам расчета интегрального индекса группы территориальных показателей за 2016 г.

**Fig. 5**

Map-scheme of zoning of the territory of the Tyumen agglomeration based on the results of calculating the Integral Index of the group of territorial indicators for 2016



**Условные обозначения**

Интегральный индекс группы территориальных показателей

0–0,058 (абсолютно низкий уровень)

0,059–0,10 (низкий уровень)

На рис. 4–8 отражены результаты автоматизированных расчетов соответствующих индексов через разработанный программный модуль, полученные в виде карт-схем зонирования земель в границах агломерации на примере земель Тюменской городской агломерации для 2016 года.

Согласно данным, представленным на рис. 4, социально-экономические показатели городского округа г. Тюмень соответствуют низкому уровню, остальные территориальные единицы городской агломерации по тем же показателям находятся на абсолютно низком уровне. Данные результаты вполне объяснимы, поскольку городской округ г. Тюмень является ядром исследуемой Тюменской городской агломерации, ядро — это центр притяжения, как правило, выделяющийся наибольшими значениями социально-экономических показателей, что подтверждается полученными результатами расчета модуля.

На основе данных, представленных на рис. 5, можно сделать вывод о соответствии показателей территориальной группы для Нижнетавдинского, Ярково́ского и Исетского муниципальных районов и городского округа г. Ялуторовск низкому уровню. Эти же показатели для земель в границах городского округа г. Тюмень, Тюменского и Ялуторовского районов соответствуют абсолютно низкому уровню — кризисному состоянию. Такой результат свидетельствует о том, что показатели развития территории в территориальном аспекте будут занижены в густонаселенных территориальных единицах агломерации, а также в муниципальных образованиях, обладающих малой протяженностью транспортной сети, но при этом имеющих высокую нагрузку на существующую транспортную сеть.

В результате расчетов промежуточных индексов оценки пространственного развития территории программный модуль сводит их в итоговый интегральный индекс агломерации:

$$5 \quad \text{III}_{\text{агл}} = \sum_{k=1}^j \text{III}_k^j,$$

где  $\text{III}_{\text{агл}}$  — итоговый интегральный индекс агломерации;

$\text{III}_k^j$  — итоговый интегральный индекс муниципального образования  $j$  в составе агломерации.

Результаты вычисленных итоговых интегральных индексов в динамике за 5 лет представлены в табл. 3.

По картам-схемам зонирования, представленным на рис. 6–8, видно, что агломерация является развивающейся (итоговый интегральный индекс пространственного развития городской агломерации попадает в диапазон значений от 0 до 0,74, что соответствует начальному положению). Поскольку результаты расчетов интегральных индексов группы социально-экономических показателей и группы территориальных показателей попадали в диапазоны критических или низких значений, общий индекс пространственного развития для всей агломерации также соответствует низкому значению.

**Таблица 3** ▼

Расчетные значения итоговых интегральных индексов 2017–2022 гг.

**Table 3**

Calculated values of the final integral indexes 2017–2022

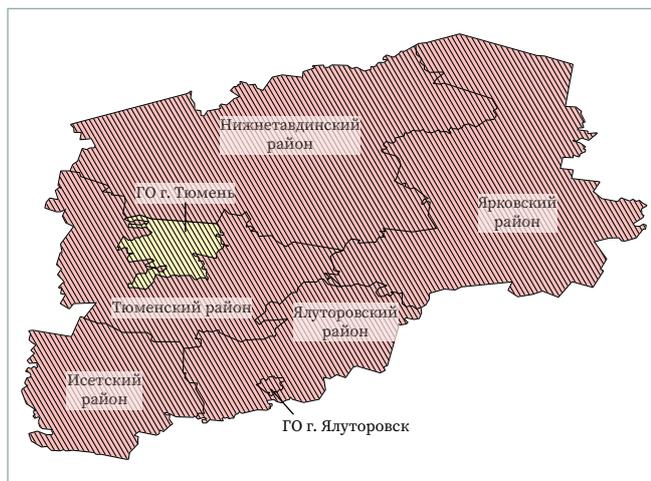
Территориальное образование	Годы					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Исетский муниципальный район	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07
Нижнетавдинский муниципальный район	0,07	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05
Тюменский муниципальный район	0,12	0,10	0,09	0,10	0,08	0,10
Ялуторовский муниципальный район	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08
Ярковский муниципальный район	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
г. Тюмень	0,19	0,18	0,17	0,17	0,18	0,17
г. Ялуторовск	0,14	0,14	0,15	0,22	0,14	0,12
Тюменская городская агломерация	0,69	0,66	0,66	0,73	0,64	0,61

**Рис. 7** ▼

Карта-схема зонирования территории Тюменской агломерации по результатам расчета итогового интегрального индекса агломерации с наложением на зонирование территории на основе рассчитанного интегрального индекса группы социально-экономических показателей за 2016 г.

**Fig. 7**

Map-scheme of zoning of the territory of the Tyumen agglomeration based on the results of calculating the final integral index of the agglomeration with overlay on the zoning of the territory based on the calculated integral index of the socio-economic group for 2016



**Условные обозначения**

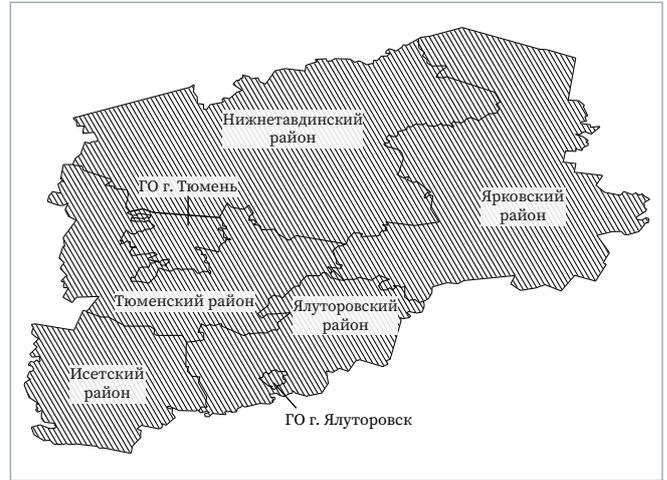
- Интегральный индекс группы социально-экономических показателей
- 0–0,058 (абсолютно низкий уровень)
- 0,059–0,10 (низкий уровень)
- Итоговый интегральный индекс агломерации
- 0–0,74

**Рис. 6** ▼

Карта-схема зонирования территории Тюменской агломерации по результатам расчета итогового интегрального индекса агломерации за 2016 г.

**Fig. 6**

Map-scheme of zoning of the territory of the Tyumen agglomeration based on the results of calculating the Final Integral Index of the agglomeration for 2016



**Условные обозначения**

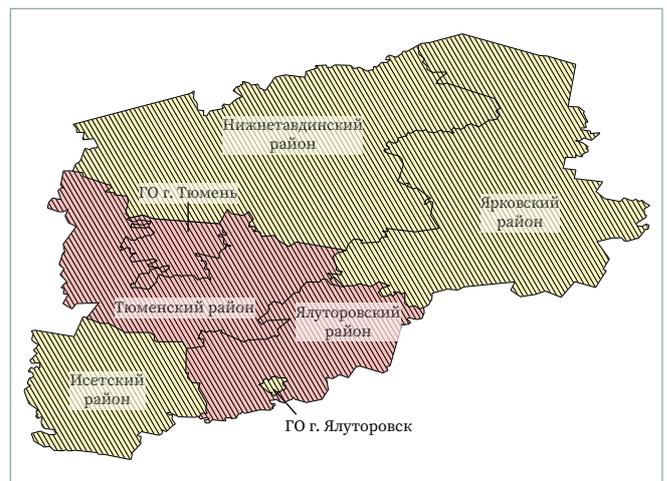
- Итоговый интегральный индекс агломерации
- 0–0,74

**Рис. 8** ▼

Карта-схема зонирования территории Тюменской агломерации по результатам расчета итогового интегрального индекса агломерации с наложением на зонирование территории на основе рассчитанного интегрального индекса группы территориальных показателей за 2016 г.

**Fig. 8**

Map-scheme of zoning of the territory of the Tyumen agglomeration based on the results of calculating the final integral index of the agglomeration with overlay on the zoning of the territory based on the calculated integral index of the group of territorial indicators for 2016



**Условные обозначения**

- Интегральный индекс группы территориальных показателей
- 0–0,058 (абсолютно низкий уровень)
- 0,059–0,10 (низкий уровень)
- Итоговый интегральный индекс агломерации
- 0–0,74

## 4 Выводы

В исследовании отражены результаты разработки автоматизированного программного модуля в целях проведения оценки пространственного развития земель городской агломерации. Разработанный программный модуль обеспечивает автоматизированную обработку загруженных групп показателей развития и отображение актуальных результатов оценки пространственного развития земель городской агломерации на текущий момент и в динамике для проведения комплексного анализа ситуации и последующего принятия эффективных управленческих решений. В связи с этим данный программный модуль оценки может найти практическое применение во внедрении его как раздела в информационную систему обеспечения градостроительной деятельности. Полученные результаты оценки пространственного развития земель городских агломераций способствуют более эффективной разработке стратегических и программных документов развития муниципальных образований. Работоспособность и функциональность разработанного программного модуля апробированы на примере Тюменской городской агломерации.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Карпик А.П., Мусихин И.А., Ветошкин Д.Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26. № 2. С. 155–163. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
2. Карпик А.П., Жарников В.Б., Ларионов Ю.С. Рациональное землепользование в системе современного пространственного развития страны, его основные принципы и механизмы // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24. № 4. С. 232–246. DOI:10.33764/2411-1759-2019-24-4-232-246.
3. Черных Е.Г., Сизов А.П., Филимонова Л.А. Формирование системы многоступенчатой оценки показателей пространственного развития территории, отражающей специфику сложноустроенного субъекта (на примере Тюменской области) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 3. С. 320–329. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-320-329.
4. Черных Е.Г., Сизов А.П. Разработка программного обеспечения для анализа показателей пространственного развития территории // Пространственные данные: наука и технологии. 2021. № 12. С. 210–221. DOI:10.30533/scidata-2021-12-210-221.
5. Черных Е.Г., Сизов А.П. Разработка программного обеспечения для анализа показателей пространственного развития территории сложноустроенного субъекта // International agricultural journal. 2021. № 1. С. 239–256.
6. Черных Е.Г., Меркурьева К.Р. Разработка программного модуля для оценки пространственного развития территории субъекта Российской Федерации // Геодезия и картография. 2023. Т. 84. № 8. С. 49–56. DOI:10.22389/0016-7126-2023-998-8-49-56.
7. Лаппо Г.М. Методика исследования региональных систем городских поселений // Региональные исследования. 2023. № 2(80). С. 5–11. DOI:10.5922/1994-5280-2023-2-1.
8. Лаппо Г.М., Полян П.М., Селиванова Т. В. Агломерации России в XXI веке // Вестник Фонда регионального развития Иркутской области. 2014. № 1. С. 45–52.
9. Камынина Н.Р. Планирование и развитие городских территорий // Вестник СГУГиТ. 2016. Т. 4. № 36. С. 184–190.
10. Тараненко Л.С., Тараненко С.В. Разработка модуля для комплексной оценки сценариев социально-экономического и пространственного развития территорий // Сборник материалов XIX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 7. № 2. С. 75–81.
11. Бойко В.В., Жеведь А.С. Применение методов пространственного анализа при проведении социально-экономической оценки региона // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2019. № 4. С. 18–24. DOI:10.23885/2500-123X-2019-2-4-18-24.

12. Атаманов С.А. Разработка методики автоматизации решения задач оперативного управления территорией: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 122 с.
13. Хитрин М.О. Создание адаптивного геоаналитического портала управления территориями на основе методики многоступенчатого выбора открытых компонентов: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2017. 131 с.
14. Бурмакина Н.И., Илюшин А.В., Илюшина Т.В. и др. Информационные ресурсы государственного кадастра недвижимости и территориального планирования в пространственном развитии государства: монография / под общ. ред. А.П. Сизова. М.: Русайнс, 2016. 86 с.

**АВТОРЫ** **Богданова Ольга Викторовна**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
кафедра геодезии и кадастровой деятельности,  
Институт сервиса и отраслевого управления  
д-р экон. наук, доцент  
 0000-0003-3643-0179

**Меркурьева Кристина Рудольфовна**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
кафедра геодезии и кадастровой деятельности,  
Институт сервиса и отраслевого управления  
 0000-0001-6650-9107

Поступила 24.02.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликована 30.06.2025.



# Development of a software module for conducting an assessment of the spatial development of lands in an urban agglomeration

**Olga V. Bogdanova<sup>1</sup>, Kristina R. Merkurieva<sup>1</sup>** 

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
 k\_r\_merkurieva@mail.ru

**CITATION** Bogdanova OV, Merkurieva KR. Development of a software module for conducting an assessment of the spatial development of lands in an urban agglomeration. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 61–73. DOI:10.30533/GiA-2025-021.

**KEYWORDS** spatial development of the territory, QGIS software module, lands of the Tyumen urban agglomeration, automated calculation, zoning of the territory, territorial indicators, final integral index of agglomeration

**ABSTRACT** The article is devoted to the development of an automated software module for assessing the spatial development of lands in urban agglomerations. The authors provide a brief description of the QGIS software used as a platform for the developed software module, and also provide an overview of the programming language and libraries used to develop the software module. The article describes the tools of the developed plug-in, its functionality, and provides examples of system calculations. The authors propose to assess the spatial development of the studied territory by calculating four integral indices. The proposed automated software module performs calculations based on the selected indicators, taking into account the development of territorial units within the agglomeration by socio-economic and territorial indicators, on the basis of which, using the developed scale for interpreting the results, it displays a zoning map of the selected territory to the user. The functionality and performance of the developed software module were tested using the example of assessing the spatial development of lands in the Tyumen urban agglomeration. The authors' development allows for automated processing of loaded groups of development indicators and display of current results of the assessment of spatial development of lands of the urban agglomeration at the current moment and in dynamics in order to conduct a comprehensive analysis of the situation and subsequent adoption of effective management decisions, and can also be used for more effective development of strategic and program documents for the development of municipalities.

- REFERENCES**
1. Karpik AP, Musikhin IA, Vetoshkin DN. Intellektual'nye informacionnye modeli territorij kak jeffektivnyj instrument prostranstvennogo i jekonomicheskogo razvitija [Intelligent information models of territories as an effective tool for spatial and economic development]. *Vestnik SSUGT*. 2021;26(2): 155–163. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
  2. Karpik AP, Zharnikov VB, Larionov YuS. Racional'noe zemlepol'zovanie v sisteme sovremennogo prostranstvennogo razvitija strany, ego osnovnye principy i mehanizmy [Rational land use in the system of modern spatial development of the country, its basic principles and mechanisms]. *Vestnik SSUGT*. 2019;24(4): 232–246. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2019-24-4-232-246.
  3. Chernykh EG, Sizov AP, Filimonova LA. Formirovanie sistemy mnogostupenchatoj ocenki pokazatelej prostranstvennogo razvitija territorii, otrazhajushhej specifiku slozhnoustroennogo sub'ekta (na primere Tjumenskoj oblasti) [Formation of a system of multi-stage assessment of indicators of spatial development of a territory, reflecting the specifics of a complex subject (using the example of the Tyumen region)]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(3): 320–329. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-320-329.
  4. Chernykh EG, Sizov AP. Razrabotka programmnoho obespechenija dlja analiza pokazatelej prostranstvennogo razvitija territorii [Development of software for analyzing indicators of spatial development of the territory]. *Spatial data: science and technology*. 2021;12: 210–221. (In Russian). DOI:10.30533/scidata-2021-12-210-221.
  5. Chernykh EG, Sizov AP. Razrabotka programmnoho obespechenija dlja analiza pokazatelej prostranstvennogo razvitija territorii slozhnoustroennogo sub'ekta [Development of software for the analysis of spatial development indicators of the territory of a complex entity]. *International agricultural journal*. 2021;1: 239–256. (In Russian).
  6. Chernykh EG, Merkurieva KR. Razrabotka programmnoho modulja dlja ocenki prostranstvennogo razvitija territorii sub'ekta Rossijskoj Federacii [Development of a software module for assessing the spatial development of the territory of a constituent entity of the Russian Federation]. *Geodesy and Cartography*. 2023;84(8): 49–56. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2023-998-8-49-56.
  7. Lappo GM. Metodika issledovanija regional'nyh sistem gorodskih poselenij [Methodology for studying regional systems of urban settlements]. *Regional studies*. 2023;2(80): 5–11. (In Russian). DOI:10.5922/1994-5280-2023-2-1.
  8. Lappo GM, Polyan PM, Selivanova TV. Aglomeracii Rossii v XXI veke [Agglomerations of Russia in the XXI century]. *Bulletin of the Regional Development Fund of the Irkutsk Region*. 2014;1: 45–52. (In Russian).
  9. Kamynina NR. Planirovanie i razvitie gorodskih territorij [Planning and development of urban areas]. *Vestnik SSUGT*. 2016;4(36): 184–190. (In Russian).
  10. Taranenko LS, Taranenko SV. Razrabotka modulja dlja kompleksnoj ocenki scenarijev social'no-jekonomicheskogo i prostranstvennogo razvitija territorij [Development of a module for a comprehensive assessment of scenarios of socio-economic and spatial development of territories]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XIX International scientific congress*. In 8 vols. Novosibirsk: SSUGT; 2023;7(2): 75–81. (In Russian).
  11. Boyko VV, Zheved AS. Primenenie metodov prostranstvennogo analiza pri provedenii social'no-jekonomicheskoi ocenki regiona [Application of spatial analysis methods in conducting a socio-economic assessment of a region]. *Ecology. Economics. Informatics. Series: Geoinformation technologies and space monitoring*. 2019;4: 18–24. (In Russian). DOI:10.23885/2500-123X-2019-2-4-18-24.
  12. Atamanov SA. *Razrabotka metodiki avtomatizacii reshenija zadach operativnogo upravlenija territoriej* [Development of a methodology for automating the solution of problems of operational management of a territory] [dissertation]. Moscow; 2008. 122 p. (In Russian).
  13. Khitrin MO. *Sozdanie adaptivnogo geoanaliticheskogo portala upravlenija territorijami na osnove metodiki mnogostupenchatogo vybora otkrytyh komponentov* [Creation of an adaptive geoanalytical portal for territorial management based on the methodology of multi-stage selection of open components] [dissertation]. Chelyabinsk; 2017. 131 p. (In Russian).

14. Burmakina NI, Ilyushin AV, Ilyushina TV, et al. *Informacionnye resursy gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti i territorial'nogo planirovaniya v prostranstvennom razvitii gosudarstva* [Information resources of the state real estate cadastre and territorial planning in the spatial development of the state] [monograph]. Moscow: Rusains; 2016. 86 p. (In Russian).

**AUTHORS** **Olga V. Bogdanova**

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
Department of Geodesy and Cadastral Activity,  
Institute of Service and Industry Management  
Dr. of Sci. (Economics), Associate Professor  
 0000-0003-3643-0179

**Kristina R. Merkurieva**

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
Department of Geodesy and Cadastral Activity,  
Institute of Service and Industry Management  
 0000-0001-6650-9107

Submitted: February 24, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Поведенческая декомпозиция: метод проектирования адаптивных геоинформационных технологий

**О.Г. Гвоздев<sup>1</sup>** 

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
 gvozdev@miigaik.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Гвоздев О.Г. Поведенческая декомпозиция: метод проектирования адаптивных геоинформационных технологий // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 74–93. DOI:10.30533/GiA-2025-022.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** поведенческая декомпозиция, адаптивные геоинформационные технологии, программная инженерия, программная архитектура

**АННОТАЦИЯ** В статье рассматривается проблема обеспечения адаптивности при разработке информационных систем в целом и геоинформационных систем и технологий в частности. Под адаптивностью в рамках данной работы понимается свойство архитектуры программного решения, способствующее (или препятствующее) удовлетворению новых требований до того, как они станут известны. Предлагается метод проектирования адаптивных геоинформационных технологий, получивший название «поведенческая декомпозиция». Область его применения — моделирование отдельных сложных процедур обработки пространственных данных. Рассмотрены существующие в отрасли подходы и предпосылки к появлению нового метода, его теоретическая база и лежащие в его основе принципы, в числе которых шаблоны проектирования «Стратегия» и «Спецификация», принцип инверсии управления, а также решения, предложенные Э. Эвансом в работе “Domain Driven Design”. Приведены приемы применения метода к практическим задачам, человеко-машинночитаемая нотация для записи решений на любом этапе проектирования. В качестве примеров рассмотрены модели двух процедур обработки пространственных данных, построенные с использованием предложенного метода: свертка двумерного растра на регулярной сетке и метод семплирования и аугментации спутниковых изображений SEGA. Освещается опыт практического применения предложенного метода, выявленные ограничения и способы их преодоления.

# 1 Введение

Развитие любой области деятельности неразрывно связано с ростом потребления ее результатов, ростом ожиданий от этих результатов и, наконец, ростом требований к этим результатам. Удовлетворение внешних требований происходит за счет повышения внутренних требований к процессам достижения продуцируемых результатов: продуктов, сервисов или услуг. Так, программная инженерия прошла большой путь от доказательства концептуальной возможности решения элементарных задач до появления систем принципиально нового класса — так называемых программно-определяемых технологий<sup>1,2</sup> (*англ.* software-defined technologies) [1].

Первые достижения в этой области связаны с применением программно-определяемых технологий к решению задач инфраструктуры автоматизированных информационных систем. В их числе: программно-определяемые системы хранения<sup>3</sup> (*англ.* software-defined storage) [2, 3], программно-определяемая сетевая инфраструктура (*англ.* software-defined networking) [4, 5], программно-определяемая радиосвязь (*англ.* software-defined radio) [6, 7], концепция «инфраструктура как код»<sup>4</sup> (*англ.* infrastructure as a code)<sup>5</sup>. Активно исследуется возможность построения программно-определяемых производств (*англ.* software-defined factory, software-defined manufacturing) [8, 9]. Некоторые направления исследований и разработок, такие как системы распределенного реестра<sup>6,7</sup> [10, 11], смарт-контракты (*англ.* smart contracts) [12–14], в перспективе могут позволить перевести целые общественные институты в полностью автоматическую программно-определяемую форму.

В этих обстоятельствах приобретает особую значимость программируемость (способность изменять функционирование системы без изменения ее физической структуры), и, как следствие, программная инженерия становится одним из важнейших видов деятельности, а требования к ней и ее результатам оказываются как никогда высокими.

Производительность (*англ.* performance), эффективное использование вычислительных ресурсов (*англ.* resource-efficiency), надежность (*англ.* reliability), устойчивость к изменениям среды функционирования (*англ.* resilience), удобство эксплуатации (*англ.* useability), наблюдаемость (*англ.* observability), сопровождаемость (*англ.* maintainability) — в начале 2000-х годов этот список требований был близок к эталонному. В начале 2010-х годов к ним добавились горизонтальная и вертикальная масштабируемость (*англ.* horizontal and vertical scalability): потребность в программировании малых устройств с ограниченными вычислительными ресурсами и малым автономным запасом электропитания (смартфоны, планшеты, умные часы и другие формы носимых персональных компьютеров) выросла одновременно с потребностью

- 
- 1 Software Defined Anything Market Overview / Market Research Future. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/software-defined-anything-market-24425> (дата обращения: 19.08.2024).
  - 2 The software-defined future of industries / intive. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.intive.com/insights/the-software-defined-future-of-industries> (дата обращения: 13.09.2024).
  - 3 Software-defined storage (SDS) / TechTarget. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/software-defined-storage> (дата обращения: 28.08.2024).
  - 4 Moving from Infrastructure Automation to True DevOps. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://devops.com/moving-from-infrastructure-automation-to-true-devops> (дата обращения: 02.09.2024).
  - 5 Wittig A., Wittig M. Amazon Web Services in Action. New York: Manning Press, 2016. 93 p.
  - 6 Distributed Ledger Technology: beyond block chain. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf) (дата обращения: 07.09.2024).
  - 7 Машиночитаемая доверенность // Федеральная налоговая служба: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://m4d.nalog.gov.ru/emchd> (дата обращения: 04.09.2024).

в разработке программных решений, обрабатывающих петабайты данных на десятках и сотнях тысяч вычислительных узлов.

К 2025 году все перечисленное стало немислимим без облачных сервисов, позволяющих пользователю не заботиться о хранении данных или выполнении сложных ресурсоемких вычислений на собственных устройствах<sup>8</sup> [15], тщательно проработанного в части эстетики, эргономики, возможности интуитивного и рационального использования пользовательского интерфейса (*англ.* user interface, user experience, UI/UX)<sup>9</sup> [16], автоматизации с помощью моделей машинного обучения, включающих современные искусственные нейронные сети и большие языковые модели [17].

Нельзя не упомянуть и возросшие требования регуляторов по защите персональных данных и обеспечению других аспектов информационной безопасности, в частности требования к объектам критической информационной инфраструктуры, сложности работы информационных систем, функционирующих во множестве юрисдикций, и многие другие вопросы, не являющиеся по своей сути ни научными, ни инженерно-техническими, но активно влияющие на образ современных информационных систем. Даже относительно простые, узкоспециализированные, нишевые информационные системы сталкиваются со всеми перечисленными требованиями либо в явной (в виде требований заказчиков, контрагентов или регуляторов), либо в неявной (в виде пользовательских ожиданий) форме. При этом требования к скорости и рациональности разработки, в частности в виде минимизации времени между формированием идеи и выводом ее прототипа на рынок (*англ.* time to market)<sup>10,11</sup>, также непрерывно растут.

Оптимизация процессов разработки программных решений полагается на развитие теоретической и инструментально-технологической базы и возможность задействования существующих программных решений путем их приспособления к новым задачам и обстоятельствам функционирования либо использования их компонентной базы для построения производных решений. Данные вопросы имеют как предметно-независимый аспект, например развитие языков программирования общего назначения и оптимизирующих компиляторов для них, развитие программных библиотек, практик и инструментальной базы разработки как таковой, так и предметно-зависимые аспекты.

Применительно к предметной области геоинформатики возможность задействования существующих программных решений рассмотрена в первой публикации данного цикла [18] в широком смысле — как проблема адаптивности программных решений. При этом особое внимание уделяется функциональной адаптивности и устоявшимся шаблонам ее реализации и эксплуатации, обуславливающим, в свою очередь, текущий (относительно высокий) уровень адаптивности геоинформационных систем, основы которого были заложены ввиду роли геоинформационных систем как средства интеграции и совместной обработки сведений, изначально относящихся к различным предметным областям, предполагающим различные способы получения и представления. Однако сформированные подходы, сохранившись со времен формирования геоинформатики без существенных изменений, к настоящему моменту начинают уступать прогрессу, достигнутому в смежных областях, емких в части применения информационных технологий, и, как следствие, перестают отвечать потребностям практики.

8 Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing / National Institute of Standards and Technology, 2001. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf> (дата обращения: 15.12.2024).

9 The Definition of User Experience (UX) / NNgroup. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nngroup.com/articles/definition-user-experience> (дата обращения: 09.09.2024).

10 Cohen M. A., Eliasberg J., Ho T.H. New product development: The performance and time-to-market tradeoff // Management Science. 1996. Vol. 42. No. 2. P. 173–186.

11 Brown C.L., Lattin J. Investigating the Relationship Between Time in Market and Pioneering Advantage // Management Science. 1994. Vol. 40. No. 10. P. 1361–1369.

В предыдущей работе автора [18] выявлена системная проблема программной инженерии, свойственная геоинформационным технологиям, и для дальнейшей теоретической и прикладной проработки поставлен вопрос о том, какие принципы и методы должны использоваться при проектировании сложных процедур обработки пространственных данных, чтобы полученная реализация обладала высокой степенью адаптивности при сохранении возможности обеспечить производительность на уровне специализированных решений, не отягощенных механизмами адаптивности. Кроме того, показана важность решения данного вопроса как в производственных процессах, т. е. при разработке решений, ориентированных на конечных пользователей, так и в исследовательских процессах, направленных на поиск решений, предполагающих множество экспериментов.

В данной работе предлагается оригинальный метод проектирования адаптивных геоинформационных технологий, набор приемов, уточняющих его применение на практике, а также технические решения, способствующие разработке с его применением.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Предпосылки и теоретическая основа метода поведенческой декомпозиции

Создание программной реализации любой нетривиальной процедуры обработки пространственных данных не является задачей с однозначным решением. Так, основная сложность чаще всего заключается в определении оптимального с точки зрения заявленных требований решения из множества всех возможных. При этом перечень заявленных требований может быть как неполным, так и избыточным, может содержать противоречия, неточности или быть частично неактуальным (устаревшим).

Такие свойства, как производительность, зависят от рациональности последовательности команд, которая фактически выполняется вычислительным устройством. Однако, например, сопровождаемость и адаптивность определяются главным образом тем, насколько структура исходного кода способствует его модификации, а семантика удобна для понимания и в оптимальной степени моделирует предметную область.

В наиболее вычислительно-эффективных решениях сохраняется минимум семантических свойств предметной области. И напротив, исходный код, отражающий все детали предметной области, имеет тенденцию к низкой производительности. Данное противоречие частично решается с помощью оптимизирующих компиляторов. Особого внимания заслуживают достижения проектов Julia [19] и Triton<sup>12</sup>, основанных, в свою очередь, на достижениях проекта LLVM [20]. Однако полное решение этой проблемы — получение оптимальной с точки зрения вычислительной эффективности реализации из оптимальной с точки зрения сопровождаемости и адаптивности реализации — на текущем уровне научно-технического развития не представляется возможным. С этим фактом в значительной степени связано множество современных исследований и разработок.

Так, новый подход к проблеме развивается в области моделирования искусственных нейронных сетей, в частности в рамках проектов PyTorch [21] и JAX<sup>13</sup>.

12 Introducing Triton: Open-source GPU programming for neural networks / OpenAI. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openai.com/index/triton/> (дата обращения: 02.09.2024).

13 Bradbury J., Frostig R., Hawkins P., et al. JAX: Autograd and XLA // Astrophysics Source Code Library. 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ascl.net/2111.002> (дата обращения: 15.12.2024).

Его можно рассматривать как гибридизацию императивной и декларативной парадигм программирования: императивная программа на медленном, но выразительном языке программирования Python используется как декларативная. Из нее извлекается структура базовых операций, далее являющаяся основой для генерации машинного кода, в котором операции «сплавлены» (*англ.* fused) в единое целое и адаптированы к текущим обстоятельствам эксплуатации: конкретному оборудованию (CPU или GPGPU), обрабатываемым типам данных и др. Этот процесс реализуется на базе таких компонентов, как Triton<sup>14</sup>, Torch Dynamo<sup>15</sup>, XLA<sup>16,17</sup>.

Это не является компиляцией в привычном смысле: исходная программа не проходит цепочку эквивалентных преобразований, приводящую ее к результирующей форме, а используется для формирования требований к итоговой программе. Этот подход применим лишь для малого подмножества возможностей базового языка программирования и не подходит для задач, где сложность структур данных и вариативность их поведения доминируют над объемом вычислений. Качественная и полная реализация этого подхода чрезвычайно сложна и трудоемка, что ограничивает его применимость только задачами, одновременно очень востребованными и при этом требовательными к вычислительным ресурсам. Ярчайшим примером задач такого типа является моделирование искусственных нейронных сетей, для которого данные системы и реализованы. В силу этого традиционные подходы программной инженерии не утрачивают актуальности.

Выявленные в работе [18] классы адаптивности существенно отличаются по «мощности» — выразительным возможностям или «моделирующей способности». Так, к одним из самых «мощных» относится A.INJECT — инъекционная адаптивность: если процедура параметризуется опцией-перечислением (A.ENUM), то ее можно преобразовать в процедуру, параметризуемую произвольной реализацией (A.INJECT). Любая композиция (A.COMPOSE) — конвейер или граф операций (представление, являющееся стандартом де-факто при моделировании процессов обработки пространственных данных в геоинформационных системах) — также может быть выражена с помощью структуры, в которой одни исполняемые блоки параметризуются другими (A.INJECT). Обратные преобразования без потери функциональности в общем случае невозможны.

В объектно-ориентированном программировании (ООП) такое преобразование соответствует шаблону проектирования «Стратегия»<sup>18,19</sup> [22, 23], а в функциональном программировании реализуется на базе функций высших порядков. Дальнейшим обобщением этих принципов являются концепции инверсии управления (*англ.* Inversion of Control) и внедрения зависимостей (*англ.* Dependency Inversion)<sup>20,21</sup>.

- 
- 14 Introducing Triton: Open-source GPU programming for neural networks / OpenAI. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openai.com/index/triton/> (дата обращения: 02.09.2024).
  - 15 Dynamo Overview / PyTorch [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://pytorch.org/docs/stable/torch.compiler\\_dynamo\\_overview.html](https://pytorch.org/docs/stable/torch.compiler_dynamo_overview.html) (дата обращения: 12.09.2024).
  - 16 Bradbury J., Frostig R., Hawkins P., et al. JAX: Autograd and XLA // Astrophysics Source Code Library. 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ascl.net/2111.002> (дата обращения: 15.12.2024).
  - 17 OpenXLA. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openxla.org> (дата обращения: 13.09.2024).
  - 18 Refactoring to patterns. Replace conditional logic with strategy / Medium. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://medium.com/@Yerazhas/refactoring-to-patterns-replace-conditional-logic-with-strategy-9970e057093a> (дата обращения: 08.09.2024).
  - 19 Garbinato B., Guerraoui R. Using the Strategy Design Pattern to Compose Reliable Distributed Protocols // Proceedings of the 3rd USENIX Conference on Object-Oriented Technologies and Systems (COOTS'97). Berkeley, USENIX Association, 1997. Vol. 3. P. 17–29.
  - 20 Gamma E., Helm R., Johnson R., et al. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Boston: Addison-Wesley, 1994. 395 p.
  - 21 Johnson R.E., Foote B. Designing Reusable Classes // Journal of Object-Oriented Programming. 1988. Vol. 1. No. 2. P. 22–35.

Особый интерес с точки зрения адаптивности представляет шаблон ООП «Спецификация»<sup>22</sup>, предполагающий представление сложных правил за счет комбинирования элементарных правил с помощью логических операций «Не», «Или», «И».

Такая объектная структура может отвечать на вопрос: «Соответствует ли объект А спецификации?», — может быть применена для генерации своего представления на другом языке программирования, что используется для генерации SQL-запросов в ORM<sup>23</sup>. Подобные спецификации могут иметь произвольное количество точек входа, а интроспекция<sup>24</sup> позволяет применять к ним преобразования, изначально не предусмотренные в их реализации, в частности техники метапрограммирования, аналогичные упомянутым в начале раздела.

Особо необходимо отметить работу Э. Эванса “Domain Driven Design”<sup>25</sup>, которая посвящена предметно-ориентированному проектированию программных систем и в которой предлагается комплексный подход по воплощению модели предметной области в архитектуре информационной системы.

Результатом авторского переосмысления и обобщения перечисленных методов программной инженерии в приложении к задачам, характерным для геоинформатики (главным образом задачам разработки сложных процедур преобразования пространственных данных), является предлагаемый в данной работе метод поведенческой декомпозиции.

## 2.2 Концепция метода поведенческой декомпозиции

Метод поведенческой декомпозиции — это метод анализа и моделирования предметной области и проектирования программных решений, воплощающих полученную модель в их архитектуре, позволяющий обеспечить высокий уровень их функциональной адаптивности. Областью применения метода являются сложные процедуры обработки пространственных данных и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в составе геоинформационных систем и технологий, а также систем с элементами пространственного анализа.

Целевым состоянием применения метода является процедура, состоящая из множества небольших блоков (объектов-спецификаций), скрытое состояние которых после создания остается неизменным (*англ.* immutable), при этом каждый из них отвечает за отдельный аспект всей процедуры и функционирует в рамках одного уровня абстракций путем диспетчеризации выполнения вложенных блоков, переданных ему в качестве аргументов, и предназначается для аналогичной передачи его в другие блоки, реализуя и эксплуатируя, таким образом, инъекционную адаптивность (A.INJECT) [18].

Объекты-спецификации предназначены для функционирования в составе структуры, являющейся исполнимой спецификацией — одновременно семантической моделью и программной реализацией требуемой специализированной версии процедуры. Каждый уровень такой иерархии последовательно уточняет функционирование предыдущего.

Такая структура может быть построена явно — пользователем (при наличии пользовательского интерфейса либо DSL) или программистом (с помощью API) — либо косвенно, с помощью вспомогательных инструментальных средств. Она может иметь произвольное количество встроенных в нее путей выполнения

22 Evans E., Fowler M. Specifications. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.martinfowler.com/aprsupp/spec.pdf> (дата обращения: 14.09.2024).

23 Bayer M. SQLAlchemy // The Architecture of Open-Source Applications. Vol. II: Structure, Scale, and a Few More Fearless Hacks / Ed. by A. Brown, G. Wilson. Mountain View, 2011. 390 p.

24 Sobel J.M., Friedman D.P. An Introduction to Reflection-Oriented Programming // Proceedings of Reflection'96. San Francisco: Springer Verlag, 1996. P. 107–126.

25 Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Boston: Addison-Wesley, 2003. 359 p.; Evans E. Domain-Driven Design Reference: Definitions and Pattern Summaries. Indianapolis: Dog Ear Pub Llc, 2014. 75 p.

и допускать создание произвольного количества сторонних механизмов, обеспечивающих альтернативные пути ее выполнения, не предусмотренные изначально реализацией. Каждый путь выполнения может реализовывать отдельную задачу или ее часть, например:

- выполнение основной части целевой задачи;
- подготовку к выполнению или очистку среды выполнения после выполнения;
- загрузку необходимых данных из внешних источников;
- формирование человекочитаемого представления внутренней структуры;
- генерацию программного кода и др.

Каждое обращение к любому из путей выполнения должно быть полностью независимым и не предполагать изменения состояния любого из объектов в составе структуры-спецификации вплоть до того, что должно быть возможно выполнение нескольких параллельных процессов, основанных на одних объектах-спецификациях. Все временные, промежуточные и окончательные данные должны быть сохранены в обрабатываемых объектах или в связанном с ними хранилище, передаваемом на вход нужного пути выполнения. Разработчик реализаций обрабатываемых объектов ответственен за создание абстракций, обеспечивающих эффективный доступ к внешним данным.

Процесс применения метода заключается в итеративном взаимном уточнении и приближении семантической модели предметной области и ее структуры-спецификации. Такой процесс позволяет найти «естественные» для данной предметной области границы вариативности, характеризующиеся, как правило, минимальным количеством данных, пересекающих такие границы.

Эмпирическим критерием корректности применения метода является близость работы со структурой-спецификацией к работе со специализированным для данной задачи DSL: полный контроль над структурой процесса при отсутствии (минимально необходимом количестве) элементов, не несущих предметного смысла. Другим признаком корректности является возможность интерпретировать отдельную версию структуры-спецификации как технического задания на разработку специализированного программного решения: достаточно конкретного, чтобы быть исполнимым, но достаточно абстрактного, чтобы не содержать избыточности и вариативных деталей реализации.

Такой подход к проектированию позволяет повысить адаптивность получаемого решения за счет кратного увеличения количества вариантов реализации каждой потенциальной модификации, среди которых путем итеративного укрупнения области вмешательства можно выбрать оптимальный, обеспечивающий необходимый баланс между затратами на разработку и качеством полученного результата.

### 2.3 Подходы и приемы применения метода поведенческой декомпозиции

В предыдущем разделе описана концептуальная схема построения архитектуры программных решений по методу поведенческой декомпозиции: определены ключевые сущности процесса и требования к ним. Однако получение оптимальной декомпозиции предметной области в объекты-спецификации, учитывающей потенциальные потребности в расширении и уточнении разработанного решения, является сложной исследовательской задачей с элементами инженерно-технического творчества. В процессе решения данной задачи происходит множество итераций, на которых уточняется как модель предметной области, так и ее воплощение в программной реализации.

В этой связи автором разрабатывается ряд взаимодополняющих подходов и приемов, в некотором смысле аналогичный ТРИЗ [24], для метода поведенческой декомпозиции. В данной работе приведены основные из них.

Восходящий подход к проектированию на основе анализа предметной области предполагает итеративное наращивание модели предметной области,

начиная с наиболее очевидных, компактных и простых в понимании и реализации блоков, а также блоков, являющихся тривиальными адаптерами для взаимодействия с внешними системами, с постепенным переходом к блокам, комбинирующим базовые и управляющим ими.

Нисходящий подход предполагает противоположное: итеративную детализацию модели предметной области от наиболее общих концепций к их детализации.

На практике часто имеет смысл одновременное или попеременное применение восходящего и нисходящего подходов.

Следующие приемы применимы на любом этапе проектирования (порядок условный):

- выделить часть, для которой очевидно существование множества взаимоисключающих версий (вариантов реализации);
- выделить часть, изменение которой наиболее вероятно, даже если альтернативные версии неочевидны;
- выделить части, взаимодействующие с внешними системами;
- выделить части, взаимодействующие со специфическими внутренними механизмами программного решения;
- выделить части, отвечающие за преобразование представлений данных;
- выделить наиболее простую или сложную часть;
- выделить наиболее изолированную (просто выделяемую) часть;
- выделить часть, минимально обменивающуюся данными со своим окружением;
- выделить части, общие для нескольких дочерних;
- выделить части, отражающие наиболее характерные проблемы предметной области;
- разделить части в соответствии с делением, принятым в предметной области;
- разделить специализированную часть на обобщенную и ее специализацию;
- разделить части, в которых решения принимаются, и части, в которых они выполняются;
- выделить часть, передающую данные между частями, принимающими решения, и частями, реализующими их;
- разделить части по характеру используемых в них данных или их представлений;
- разделить части, имеющие различный жизненный цикл;
- выделить части или пути выполнения, ответственные за инициализацию или финализацию процесса;
- выделить части, результаты которых могут быть кешированы;
- выделить части, результаты которых могут быть использованы несколькими потребителями в составе структуры-спецификации;
- разработать блок, кеширующий результаты вложенного в него блока;
- разработать объект контекста, обеспечивающий обмен данными между частями структуры-спецификации;
- поменять местами части на соседних уровнях иерархии;
- объединить части, изменение которых по отдельности невозможно;
- объединить модели нескольких родственных процедур в одну.

## 2.4 Производительность программных решений, построенных по методу поведенческой декомпозиции

Метод поведенческой декомпозиции не специфицирует конкретный набор технологий или конструкций языка программирования, на базе которых должна быть реализована разработанная модель. Как правило, разработчик или исследователь заинтересован в получении наиболее простой и гибкой реализации в рамках доступных ему инструментальных средств. Например, в рамках ООП такая реализация будет полагаться на динамическую компоновку объектов во время выполнения и динамическую диспетчеризацию обращений к их методам.

Для подходов, фактически основанных на различных версиях динамической диспетчеризации, особенно в динамических языках программирования, таких как Python, свойственно наиболее острое проявление проблем с производительностью.

Согласно опыту автора, в основной массе практически значимых случаев потери производительности не существенны, частично компенсируются за счет повышения скорости разработки либо могут быть компенсированы за счет простых приемов, таких как кэширование или локальная оптимизация отдельных блоков без изменения общей структуры. Однако, если производительность оказывается недостаточной, метод поведенческой декомпозиции оставляет множество возможностей для получения высокопроизводительных реализаций. В экспериментах автора особенно зарекомендовали себя три из них.

#### **Подход первый — обобщенное программирование**

Данный подход актуален для языков программирования с поддержкой обобщенного программирования и развитыми оптимизирующими компиляторами, таких как C++ и Rust. Автоматическая мономорфизация шаблонов типов, методов и функций позволяет избавиться от потерь производительности, связанных с динамической диспетчеризацией, но и дает возможность компилятору совместно оптимизировать части кода, относящиеся к различным компонентам. Очевидным недостатком этого подхода является невозможность конфигурирования системы во время выполнения.

#### **Подход второй — метапрограммирование**

Этот подход включает в себя все множество вариантов генерации высокопроизводительной реализации на основе структуры-спецификации в режимах JIT (*англ.* Just-in-time) или AOT (*англ.* Ahead-of-time). В современных реалиях особый интерес представляет генерация специализированной реализации для последующего выполнения на GPGPU, в том числе с помощью специализированных средств, таких как уже упомянутые Triton и XLA<sup>26</sup>. Не теряет актуальности генерация кода на C, C++, Rust или LLVM IR для последующей обработки оптимизирующим компилятором.

#### **Подход третий — автоматическое распараллеливание**

Данный подход предполагает генерацию графа элементарных операций на основе структуры-спецификации, которая далее передается в систему, обеспечивающую их параллельное выполнение. Примером такой системы может быть библиотека dask для Python [25].

## **2.5 Специализированная нотация метода поведенческой декомпозиции**

Поведенческая декомпозиция может использоваться для проектирования и моделирования программных решений задолго до их фактической реализации. Эффективность этого процесса может быть существенно увеличена за счет инструментального сопровождения, упрощающего и унифицирующего процесс проектирования.

В качестве такого инструментального сопровождения автором разрабатывается специализированная человеко-машиночитаемая нотация, основанная на характерном для языков C, C++, Java, Rust, JavaScript обозначении блоков с помощью фигурных скобок и окончании инструкций с помощью символа «;». Она содержит три основных инструкции.

26 Bradbury J., Frostig R., Hawkins P., et al. JAX: Autograd and XLA // Astrophysics Source Code Library. 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ascl.net/2111.002> (дата обращения: 15.12.2024).

1. *Реализация* — `impl NAME [TYPE] [DETAILS]` — вводит некоторый тип объектов-спецификаций.
2. *Слот* — `slot [optional] [multiple] NAME [TYPE] [DETAILS]` — обозначает вакантное место, которое может быть занято одним из объектов-спецификаций. Соответствует точке применения инъекционной адаптивности (A.INJECT).
3. *Параметр* — `param NAME [TYPE] [DETAILS]` — обозначает возможность настройки объекта-спецификации за счет передачи ему параметра. Соответствует точке применения параметрической адаптивности (A.PARAM).

В этих определениях `NAME` и `TYPE` — произвольные идентификаторы, а `DETAILS` — блок вложенных определений, заключенный в фигурные скобки; `optional` (слот может оставаться пустым) и `multiple` (слот может содержать более одной реализации) в различных комбинациях позволяют определить допустимое количество реализаций для слота.

Нотация также предполагает возможность определения методов (точек входа), комментарии, простую систему типов, основанную на типажах, и поддержку пользовательских расширений. Эти возможности не будут детально рассмотрены в предлагаемой работе в связи с ограничениями ее объема.

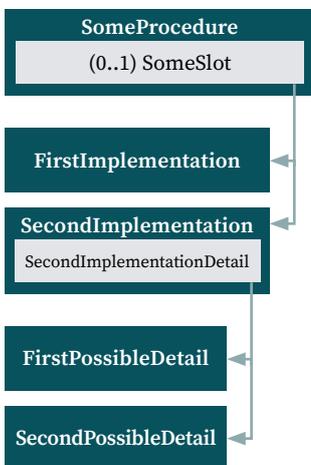
Данная нотация подразумевает работу в режиме постепенного итеративного уточнения, что предполагает постепенное наращивание объема указанных деталей, а также работоспособность при любом уровне детализации. Она является основой для построения инструментальных средств генерации программного кода, документации и другой автоматизации. Модель условной процедуры, записанная с применением предложенной нотации, визуализированная с помощью автоматизированного инструмента на базе GraphViz [26], представлена на рис. 1.

**Рис. 1** 

Модель условной процедуры, записанная с применением предложенной нотации, визуализированная с помощью автоматизированного инструмента на базе GraphViz

**Fig. 1**

A model of a conditional procedure written using the proposed notation, visualized using an automated tool based on GraphViz



**Примечание.** Оформление переработано редакцией.

### 3 Результаты

Для демонстрации работы метода предлагается рассмотреть два характерных примера.

#### Первый пример

Свертка двухмерного растра на регулярной сетке. Данная операция является известной и хорошо изученной, при этом в задачах геоинформатики, в частности обработки данных ДЗЗ или геополей, имеет множество аспектов, не характерных для других областей применения.

#### Второй пример

Метод семплирования и аугментации спутниковых изображений SEGA, применяемый для преодоления дефицита обучающих данных, а также площадного и количественного дисбаланса классов в обучающих и валидационных выборках, используемых при обучении искусственных нейронных сетей. Являясь авторской разработкой, метод изначально создавался с применением метода поведенческой декомпозиции и эволюционировал параллельно с ним. Применение поведенческой декомпозиции позволило объединить множество ситуативных решений в единый универсальный аппарат, активно используемый во множестве производственных и исследовательских задач.

Ввиду ограниченного объема публикации исходные описания с использованием предложенной человеко-машинночитаемой нотации, а также прочие материалы представлены по ссылке<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Гвоздев О.Г. Публикации по поведенческой декомпозиции. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pub.almhq.org/publications/2024-behavioral-decomposition> (дата обращения: 10.10.2024).

### 3.1 Пример 1. Свертка двумерного растра на регулярной сетке

Операция свертки двумерного растра на регулярной сетке в большинстве программного обеспечения общего назначения, осуществляющего обработку растровой графики, представлена рядом специализированных фильтров, таких как:

- размытие по Гауссу;
- определение границ;
- нерезкое маскирование (*англ.* unsharp masking);
- медианный фильтр.

В отдельных случаях присутствует возможность явного задания коэффициентов ядра свертки, на чем вариативность, как правило, заканчивается.

В задачах геоинформатики, в частности обработки данных ДЗЗ или геополей, проявляется множество особенностей данной предметной области, приводящих к необходимости построения значительно более сложных процедур свертки.

В доминирующих на рынке ГИС данные процедуры реализованы в виде монолитных блоков с набором предопределенных параметров<sup>28,29,30</sup>, что покрывает основные сценарии использования, но далеко не все из них. Особый практический интерес представляют следующие:

1. Необходимость сохранения типа данных, общего диапазона и зарезервированных значений. Так, в спутниковых изображениях отдельные значения могут иметь зарезервированную семантику и должны обрабатываться особым способом. При этом общий диапазон значений может не соответствовать типу данных. Например, в представлении с помощью 16-битных беззнаковых целых значение 0 может означать отсутствие данных, значения [1; 1000] — интенсивность, а остальные значения считаются недопустимыми.
2. Помимо вышеупомянутого, может потребоваться дополнительное маскирование (исключение из вычислений) используемых значений.
3. Возможно множество подходов к обработке краевых артефактов как путем исключения краевых значений, так и с помощью добавления синтетических данных в них — паддинга (*англ.* padding).
4. В качестве ядра свертки может выступать не только функция, выраженная в виде набора коэффициентов, но и агрегирующая функция (min, max, sum), вычисление медианы или в общем случае квантилей и т. п.
5. Свертка может осуществляться с произвольным шагом скользящего окна (*англ.* striding) и произвольным шагом между элементами скользящего окна (*англ.* dilatation).

Все эти и другие особенности могут встречаться в любых комбинациях.

Применение метода и нотации поведенческой декомпозиции позволило учесть все перечисленные аспекты и получить следующую модель процедуры свертки (рис. 2).

28 Convolution, ArcGIS Pro / Esri. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/convolution.htm> (дата обращения: 05.10.2024).

29 R.resamp.filter, GRASS GIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.resamp.filter.html> (дата обращения: 05.10.2024).

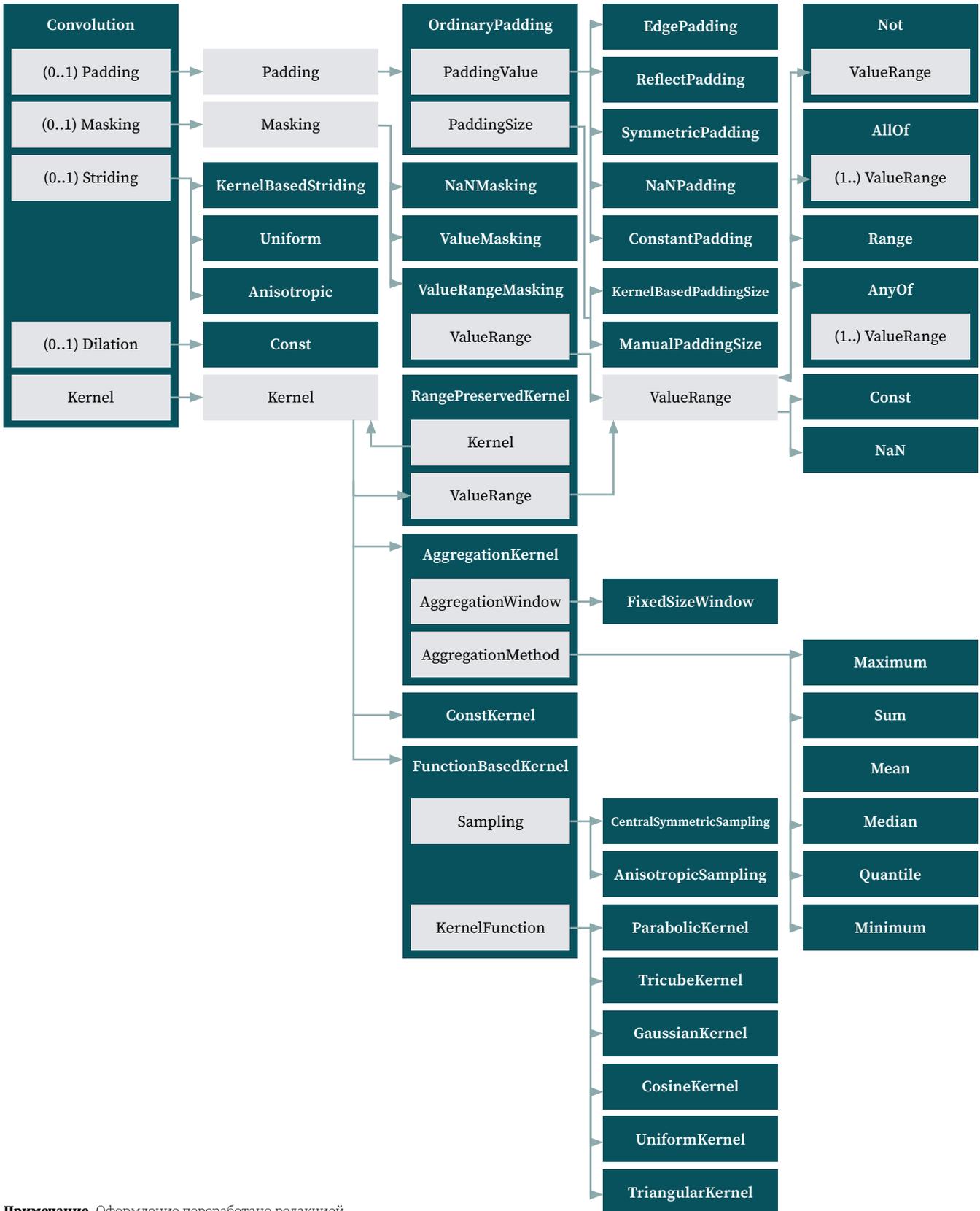
30 Convolution and Morphology Filters / L3Harris Technologies. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/convolutionmorphologyfilters.html> (дата обращения: 05.10.2024).

**Рис. 2** 

Модель процедуры свертки двумерного растра на регулярной сетке, полученная с помощью метода и нотации поведенческой декомпозиции и визуализированная с помощью автоматизированного инструмента на базе GraphViz

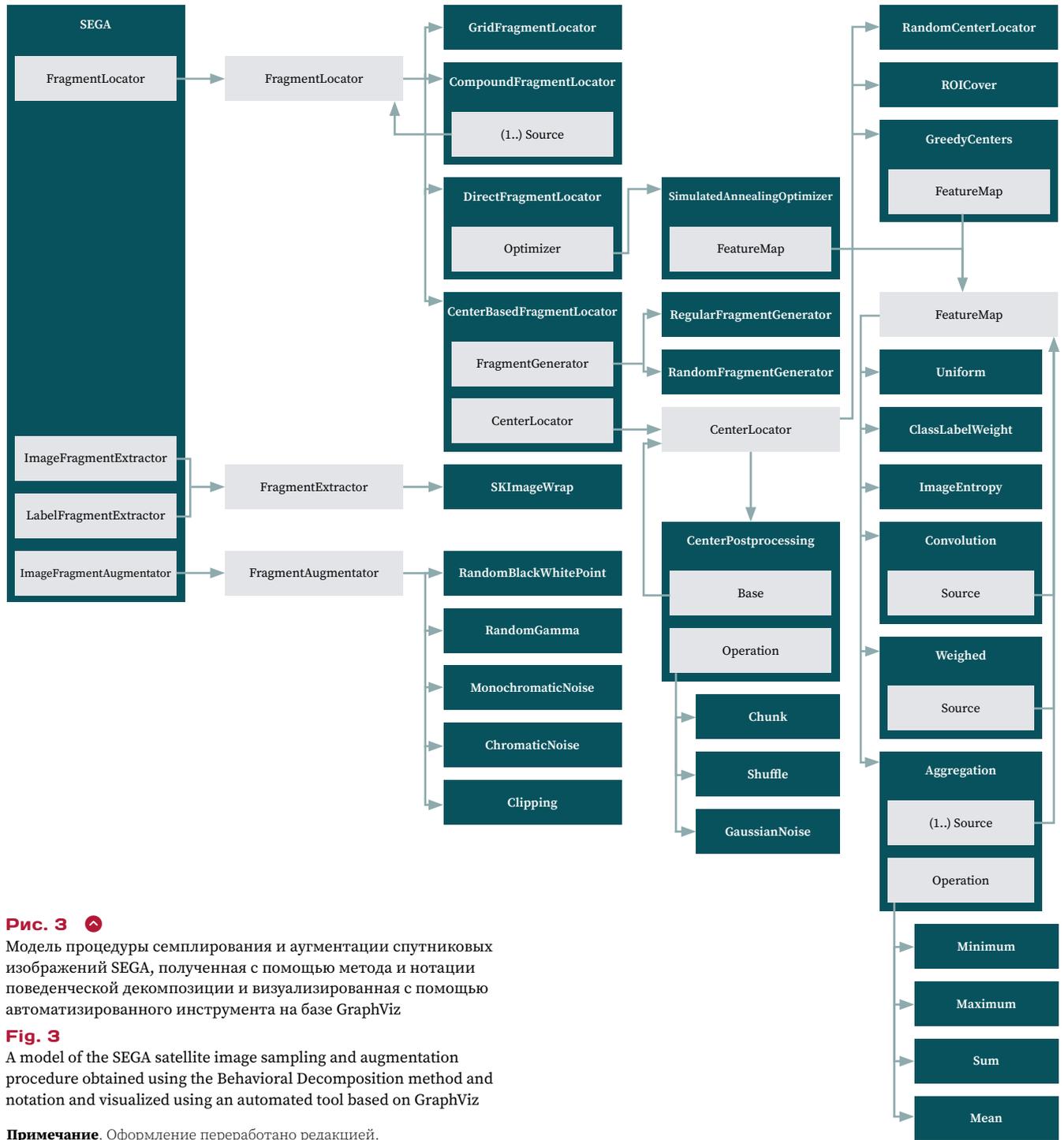
**Fig. 2**

A model of the procedure of convolution of a two-dimensional image on a regular grid, obtained using the Behavioral Decomposition method and notation and visualized using an automated tool based on GraphViz



Примечание. Оформление переработано редакцией.

### 3.2 Пример 2. Метод семплирования и аугментации спутниковых изображений SEGA



**Рис. 3** Модель процедуры семплирования и аугментации спутниковых изображений SEGA, полученная с помощью метода и нотации поведенческой декомпозиции и визуализированная с помощью автоматизированного инструмента на базе GraphViz

**Fig. 3** A model of the SEGA satellite image sampling and augmentation procedure obtained using the Behavioral Decomposition method and notation and visualized using an automated tool based on GraphViz

**Примечание.** Оформление переработано редакцией.

Метод семплирования и аугментации спутниковых изображений SEGA (рис. 3) используется для преодоления дефицита обучающих данных, а также площадного и количественного дисбаланса классов в обучающих и валидационных выборках, применяемых при обучении искусственных нейронных сетей. Его полное описание и экспериментальное исследование приведено в [27].

Суть метода состоит в определении множества четырехугольников, покрывающих изображение, их извлечении одновременно с геометрической аугментацией

и последующим выполнением цветовой аугментации. Множество четырехугольников может быть определено непосредственно, с помощью оптимизационного алгоритма, обеспечивающего покрытие изображения, пропорционально его карте значимости, определяемой для каждой области применения индивидуально, либо приближенным методом, менее точным, но более оптимальным с вычислительной точки зрения способом, заключающимся в случайной генерации четырехугольников вокруг набора центров, определяемых по следующим алгоритмам:

- регулярное покрытие;
- покрытие областей интереса (размеченных объектов) с заданным шагом (ROI Cover);
- покрытие карты значимости (GreedyCenters [28]).

Применение метода и нотации поведенческой декомпозиции позволило учесть все перечисленные аспекты.

## 4 Обсуждение

Поведенческая декомпозиция — специализированный метод проектирования и моделирования сложных адаптивных процедур обработки больших объемов относительно однородных данных. Обширный источник таких задач — предметная область геоинформатики, обработки пространственных данных и данных ДЗЗ. Рассматриваемый метод является теоретическим обобщением приемов программной инженерии, выработанных в процессе выполнения множества прикладных и исследовательских проектов.

Практическое применение данного метода многократно подтверждало высокую адаптивность получаемой архитектуры программных решений и высокую практическую полезность этой адаптивности. Но, что более важно, применение предложенного метода систематически позволяло выявлять новые подходы к решению исследуемых проблем.

Технические возможности, доступные специалистам в области программной инженерии на сегодняшний день, невероятно широки. В этой связи рационализация разработки программных систем часто достигается не благодаря созданию новых возможностей и технологий, а благодаря поиску и формализации подмножеств возможностей, использование которых сокращает область поиска решений, особенно на ранних этапах проектирования систем, при этом не внося существенных ограничений для достижимого результата и не оказывая негативного влияния на производительность труда. Предлагаемый метод можно рассматривать в этом ключе как формализацию подмножеств возможностей, позволяющую систематически получать программные решения, обладающие высокой степенью адаптивности.

С другой стороны, о предлагаемом методе можно говорить как о расширении концепции Domain-Driven Development (DDD)<sup>31</sup> на частный случай сложных процедур обработки данных.

Практика также показала ряд сложностей и ограничений, связанных с применением поведенческой декомпозиции. Получаемая структура-спецификация не позволяет обеспечить однородность шаблонов доступа к внешним данным или ресурсам (входным, выходным и промежуточным). Это требует от разработчика создания гибких абстракций, обеспечивающих оптимальный доступ к ним.

Метод требует точного понимания высокоуровневой структуры предметной области, в частности наличия моделей сущностей этой области, проектирование

<sup>31</sup> Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Boston: Addison-Wesley, 2003. 359 p.; Evans E. Domain-Driven Design Reference: Definitions and Pattern Summaries. Indianapolis: Dog Ear Pub Llc, 2014. 75 p.

которых выходит за рамки данного метода. Его применение для слабо изученных предметных областей может оказаться малоэффективным и (или) привести к неприменимым на практике результатам.

В большинстве случаев накладные расходы на выполнение процедуры, построенной по предложенному методу, будут соизмеримы с расходами на динамическую диспетчеризацию методов конкретного языка программирования. Однако в отдельных случаях это может привести к существенной деградации производительности.

Если производительность и адаптивность важны в равной степени, возможно совмещение предложенного метода с методами метапрограммирования, что предполагает генерацию низкоуровневой специализированной реализации с последующей компиляцией и оптимизацией либо задействование других преобразований, повышающих производительность. Несмотря на принципиальную реализуемость этих подходов, они существенно усложняют построение и сопровождение системы.

Количественная оценка любого метода программной инженерии — сложная задача, требующая разработки формальных методов и множества наблюдений. Исследование этого аспекта начаты, однако строгие определяющие результаты пока не получены.

## 5 Выводы

Все больше аспектов жизни начинают зависеть от программного обеспечения и программно-определяемых технологий. И тем важнее становится скорость адаптации программных решений к быстро меняющимся реалиям и новым задачам.

В данной работе предложен метод поведенческой декомпозиции, являющейся попыткой подойти к решению проблемы создания адаптивных программных решений, архитектура которых учитывает возможности их приспособления к новым задачам и обстоятельствам функционирования до того, как они станут известны.

Можно утверждать, что предлагаемое исследование является вкладом в следующий виток развития программной инженерии, на который она вышла благодаря применению ее достижений к ее собственным практикам — программно-определяемому программному обеспечению (*англ.* software-defined software), самосборке программного обеспечения [29] или программированию высшего порядка (по аналогии с функциями высших порядков), когда одни программы не просто помогают разрабатывать другие (как компиляторы, IDE и др.), а определяют создание других. Развитие этих подходов в совокупности с последними достижениями в области искусственного интеллекта может позволить расширить достижимые границы сложности задач, решаемых с помощью программных систем.

**БЛАГОДАРНОСТИ** Автор будет благодарен за любые сведения относительно опыта применения результатов данной работы, а также выражает готовность оказать содействие всем заинтересованным в практическом применении предложенного метода.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSFE-2022-0002).

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Roozbeh A., Soares J., Maguire G.Q., et al. Software-Defined “Hardware” Infrastructures: A Survey on Enabling Technologies and Open Research Directions // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2018. Vol. 20. No. 3. P. 2454–2485. DOI:10.1109/COMST.2018.2834731.
  2. Weil S.A., Brandt S.A., Miller E.L., et al. A scalable, high-performance distributed file system // Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation. Berkeley: USENIX Association, 2006. P. 307–320.

3. Goel A., Gupta S.C. Software defined storage technology // 2015 Asia-Pacific Software Engineering Conference. New Delhi, 2015. P. 6–7. DOI:10.1109/APSEC.2015.62.
4. Masoudi R., Ghaffari A. Software defined networks: A survey // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 67. P. 1–25. DOI:10.1016/j.jnca.2016.03.016.
5. Яковлев В.В., Беркинбаева Ж.М. Основные отличия между традиционными и программно-конфигурируемыми сетями // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2018. № 3. С. 5–11.
6. Dillinger M., Madani K., Alonistiotti N. Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions. New York: Wiley & Sons, 2003. 454 p.
7. Сивоконь В.П., Лапшов Д.В. Технология software defined radio в задачах контроля радиощумов // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2021. № 58. С. 17–28. DOI:10.17217/2079-0333-2021-58-17-28.
8. Lasi H., Fettke P., Kemper H.G., et al. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. 2014. Vol. 6. No. 4. P. 239–242. DOI:10.1007/s12599-014-0334-4.
9. Nayak N.G., Dürr F., Rothermel K. Software-defined environment for reconfigurable manufacturing systems // 5th International Conference on the Internet of Things (IOT). Seoul, 2015. P. 122–129. DOI:10.1109/IOT.2015.7356556.
10. Sadeghi M., Mahmoudi A., Deng X. Adopting distributed ledger technology for the sustainable construction industry: Evaluating the barriers using ordinal priority approach // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 29. P. 10495–10520. DOI:10.1007/s11356-021-16376-y.
11. Дюдикова Е.И., Куницына Н.Н. Распределенные реестры в цифровой экономике: база данных, технология или протокол? // Инновации. 2019. № 9. С. 98–106. DOI:10.26310/2071-3010.2019.251.9.015.
12. Taherdoost H. Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review // Information. 2023. Vol. 14. No. 117. P. 1–19. DOI:10.3390/infol4020117.
13. Митрофанова И.А. Законодательное регулирование «умных» контрактов: проблемы и перспективы развития // Правовая парадигма. 2018. Т. 17. № 3. С. 22–29. DOI:10.15688/lc.jvolsu.2018.4.3.
14. Гребенник О.Г., Иваницкий А.В. Умные контракты и перспектива их использования // Теория и практика современной науки. 2018. Т. 1. № 31. С. 640–642.
15. Qian L., Luo Z., Du Y., et al. Cloud computing: An overview // IEEE International Conference on Cloud Computing. Beijing, 2009. P. 626–631. DOI:10.1007/978-3-642-10665-1\_63.
16. Allam A., Razak A., Mohamed H. User experience: challenges and opportunities // Journal of Information Systems Research and Innovation. 2013. Vol. 3. P. 28–36.
17. Naveed H., Khan A.U., Qiu S., et al. A comprehensive overview of large language models // arXiv. 2024. arXiv:2307.06435. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2307.06435> (дата обращения: 15.12.2024).
18. Гвоздев О.Г. Современные геоинформационные технологии: адаптивность, адаптируемость, расширяемость, функциональная масштабируемость // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66. № 5. С. 28–46. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-28-46.
19. Bezanson J., Edelman A., Karpinski S., et al. Julia: A fresh approach to numerical computing // SIAM Review. 2017. Vol. 59. No. 1. P. 65–98. DOI:10.1137/141000671.
20. Lattner C., Adve V.S. LLVM: A compilation framework for lifelong program analysis & transformation // Proceedings of the International symposium on Code generation and optimization: feedback-directed and runtime optimization. San Jose, 2004. P. 75–86. DOI:10.1109/CGO.2004.1281665.
21. Paszke A., Gross S., Chintala S., et al. Automatic differentiation in PyTorch // Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach, 2017. P. 1–4.
22. Christopoulou A., Giakoumakis E.A., Zafeiris V.E., et al. Automated refactoring to the Strategy design pattern // Information and Software Technology. 2012. Vol. 54. P. 1202–1214. DOI:10.1016/j.infsof.2012.05.004.
23. Bala R., Kaswan K.K. Strategy Design Pattern // International Journal of Science and Research (IJSR). 2014. Vol. 3. No. 8. P. 385–387.

24. Ilevbare I.M., Probert D., Phaal R. A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice // Technovation. 2013. Vol. 33. P. 30–37. DOI:10.1016/j.technovation.2012.11.003.
25. Rocklin M. Dask: Parallel computation with blocked algorithms and task scheduling // Proceedings of the 14th Python in Science Conference. Austin, 2015. P. 130–136. DOI:10.25080/Majora-7b98e3ed-013.
26. Ellson J., Gansner E. R., Koutsofios E., et al. Graphviz and Dynagraph – Static and Dynamic Graph Drawing Tools // Jünger M., Mutzel P. (eds). Graph Drawing Software. Mathematics and Visualization. Berlin; Heidelberg: Springer, 2004. P. 127–148. DOI:10.1007/978-3-642-18638-7\_6.
27. Гвоздев О.Г., Матерухин А.В., Майоров А.А. Экспериментальное исследование метода семплирования и аугментации спутниковых изображений SEGA // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66. № 5. С. 47–59. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-47-59.
28. Gvozdev O. GreedyCenters: Satellite imagery adaptive sampling method for artificial neural networks training // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 310. P. 02001. DOI:10.1051/e3sconf/202131002001.
29. Гурьянов В.И. Самосборка программного обеспечения как паттерн проектирования // Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 62–64.

**АВТОР    Гвоздев Олег Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра информационно-измерительных систем,  
факультет геоинформатики и информационной безопасности  
канд. техн. наук  
 0000-0002-1917-3206

Поступила 09.01.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Behavior decomposition: adaptive geoinformational technologies design method

Oleg G. Gvozdev<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 gvozdev@miigaik.ru

**CITATION** Gvozdev OG. Behavior decomposition: adaptive geoinformational technologies design method. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 74–93. DOI:10.30533/GiA-2025-022.

**KEYWORDS** behavior decomposition, adaptive geoinformational technologies, software engineering, software architecture

**ABSTRACT** The paper considers the problem of development adaptive informational and geoinformational systems. In the scope of this paper, adaptivity is defined as a property of the architecture of a software solution that supports or prevents the satisfaction of new requirements before they become known. Author proposes adaptive geoinformational technologies design method, called “Behavioral Decomposition”, focused on the development of individual high complexity procedures for spatial data processing. The theoretical basis and prior work for the emergence of the method, the underlying principles and the techniques for its application to practical tasks, human-machine-readable notation for describing solutions at any stage of design are given. As examples, models of two spatial data processing procedures, designed with the proposed method, are given. The development experience and the identified limitations of the method and ways to overcome them are given.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The author would be grateful for any information on the experience of applying the results of this work, and also expresses his willingness to assist anyone interested in the implementation of the proposed method.

The results were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSFE-2022-0002).

- REFERENCES**
1. Roozbeh A, Soares J, Maguire GQ, et al. Software-Defined “Hardware” Infrastructures: A Survey on Enabling Technologies and Open Research Directions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2018;20(3): 2454–2485. DOI:10.1109/COMST.2018.2834731.

2. Weil SA, Brandt SA, Miller EL, et al. A scalable, high-performance distributed file system. *Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation*. Berkeley: USENIX Association; 2006: 307–320.
3. Goel A, Gupta SC. Software defined storage technology. *2015 Asia-Pacific Software Engineering Conference*. New Delhi; 2015: 6–7. DOI:10.1109/APSEC.2015.62.
4. Masoudi R, Ghaffari A. Software defined networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;67: 1–25. DOI:10.1016/j.jnca.2016.03.016.
5. Jakovlev VV, Berkinbaeva ZhM. Osnovnye otlichija mezhdru tradicionnymi i programmno-konfiguriruemyimi setjami [Key differences between traditional and software-configurable networks]. *Intellectual technologies on transport*. 2018;3: 5–11. (In Russian).
6. Dillinger M, Madani K, Alonistioti N. Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions. New York: Wiley & Sons; 2003. 454 p.
7. Sivokon' VP, Lapshov DV. Tehnologija software defined radio v zadachah kontrolja radioshumov [Software defined radio technology in radio noise control tasks]. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2021;58: 17–28. (In Russian). DOI:10.17217/2079-0333-2021-58-17-28.
8. Lasi H, Fettke P, Kemper HG, et al. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*. 2014;6(4): 239–242. DOI:10.1007/s12599-014-0334-4.
9. Nayak NG, Dürr F, Rothermel K. Software-defined environment for reconfigurable manufacturing systems. *5th International Conference on the Internet of Things (IOT)*. Seoul; 2015: 122–129. DOI:10.1109/IOT.2015.7356556.
10. Sadeghi M, Mahmoudi A, Deng X. Adopting distributed ledger technology for the sustainable construction industry: Evaluating the barriers using ordinal priority approach. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;29: 10495–10520. DOI:10.1007/s11356-021-16376-y.
11. Djudikova EI, Kunicyna NN. Raspredeleennye reestry v cifrovoj jekonomike: baza dannyh, tehnologija ili protokol? [Distributed registries in the digital economy: database, technology or protocol?]. *Innovations*. 2019;9: 98–106. (In Russian). DOI:10.26310/2071-3010.2019.251.9.015.
12. Taherdoost H. Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review. *Information*. 2023; 14(117): 1–19. DOI:10.3390/info14020117.
13. Mitrofanova IA. Zakonodatel'noe regulirovanie "umnyh" kontraktov: problemy i perspektivy razvitiya [Legislative Regulation of Smart Contracts: Problems and Development Prospects]. *Legal Concept*. 2018;17(3): 22–29. (In Russian). DOI:10.15688/lc.jvolsu.2018.4.3.
14. Grebennik OG, Ivanickij AV. Umnye kontrakty i perspektiva ih ispol'zovanija [Smart contracts and prospects for their use]. *Teoriya i praktika sovremennoj nauki*. 2018;1(31): 640–642. (In Russian).
15. Qian L, Luo Z, Du Y, et al. Cloud computing: An overview. *IEEE International Conference on Cloud Computing*. Beijing; 2009: 626–631. DOI:10.1007/978-3-642-10665-1\_63.
16. Allam A, Razak A, Mohamed H. User experience: challenges and opportunities. *Journal of Information Systems Research and Innovation*. 2013;3: 28–36.
17. Naveed H, Khan AU, Qiu S, et al. A comprehensive overview of large language models. *arXiv*. 2024. arXiv:2307.06435. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2307.06435> (Accessed 15 December 2024).
18. Gvozdev OG. Sovremennye geoinformacionnye tehnologii: adaptivnost', adaptiruemost', rasshirjaemost', funkcional'naja masshtabiruemost' [Modern geoinformation technologies: adaptability, adaptability, extensibility, functional scalability]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(5): 28–46. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-28-46.
19. Bezanson J, Edelman A, Karpinski S, et al. Julia: A fresh approach to numerical computing. *SIAM Review*. 2017;59(1): 65–98. DOI:10.1137/141000671.
20. Lattner C, Adve VS. LLVM: A compilation framework for lifelong program analysis & transformation. *Proceedings of the International symposium on Code generation and optimization: feedback-directed and runtime optimization*. San Jose; 2004: 75–86. DOI:10.1109/CGO.2004.1281665.
21. Paszke A, Gross S, Chintala S, et al. Automatic differentiation in PyTorch. *Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. Long Beach; 2017: 1–4.

22. Christopoulou A, Giakoumakis EA, Zafeiris VE, et al. Automated refactoring to the Strategy design pattern. *Information and Software Technology*. 2012;54: 1202–1214. DOI:10.1016/j.infsof.2012.05.004.
23. Bala R, Kaswan KK. Strategy Design Pattern. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2014;3(8): 385–387.
24. Ilevbare IM, Probert D, Phaal R. A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice. *Technovation*. 2013;33: 30–37. DOI:10.1016/j.technovation.2012.11.003.
25. Rocklin M. Dask: Parallel computation with blocked algorithms and task scheduling. *Proceedings of the 14th Python in Science Conference. Austin*; 2015: 130–136. DOI:10.25080/Majora-7b98e3ed-013.
26. Ellson J, Gansner ER, Koutsofios E, et al. Graphviz and Dynagraph – Static and Dynamic Graph Drawing Tools. *Jünger M., Mutzel P. (eds). Graph Drawing Software. Mathematics and Visualization*. Berlin; Heidelberg: Springer; 2004: 127–148. DOI:10.1007/978-3-642-18638-7\_6.
27. Gvozdev OG, Materuhin AV, Majorov AA. Jeksperimental'noe issledovanie metoda simplirovanija I augmentacii sputnikovyh izobrazhenij SEGA [Experimental study of SEGA satellite image sampling and augmentation method]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(5): 47–59. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-47-59.
28. Gvozdev OG. GreedyCenters: Satellite imagery adaptive sampling method for artificial neural networks training. *E3S Web of Conferences*. 2021;310: 02001. DOI:10.1051/e3sconf/202131002001.
29. Gur'janov VI. Samosborka programmogo obespechenija kak pattern proektirovanija [Software self-assembly as a design pattern]. *Software & Systems*. 2008;1: 62–64. (In Russian).

**AUTHOR Oleg G. Gvozdev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Information and Measurement Systems,  
 Faculty of Geoinformatics and Information Security  
 PhD in Engineering  
 0000-0002-1917-3206

Submitted: January 09, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Картографирование трансграничных болезней в Казахстане с применением ГИС-технологий

**Н.М. Раметов<sup>1,2</sup>✉, К.К. Табынов<sup>3</sup>, Ж.Дж. Байгурин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алма-Ата, Казахстан

<sup>2</sup> Институт ионосферы, Алма-Ата, Казахстан

<sup>3</sup> Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алма-Ата, Казахстан

✉ nurkuisa.rametov@gmail.com

**ЦИТИРОВАНИЕ** Раметов Н.М., Табынов К.К., Байгурин Ж.Дж. Картографирование трансграничных болезней в Казахстане с применением ГИС-технологий // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 94–108. DOI:10.30533/GiA-2025-047.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** картография, ГИС, эпидемиология, пространственный анализ, трансграничные заболевания, Казахстан, геомониторинг

**АННОТАЦИЯ** В современном мире распространение трансграничных заболеваний представляет серьезную угрозу для общественного здравоохранения, особенно в регионах с высокой миграционной активностью и сложными природными условиями. В данном исследовании использованы геоинформационные технологии для картографирования трансграничных болезней в Казахстане. Рассматриваются кейсы с нодулярным дерматитом (2016 г.) и оспой верблюдов (2018–2019 гг.), области исследования находятся в Атырауской, Мангистауской областях Казахстана и прилегающих областях России и Туркменистана. Данные были собраны из официальных источников, включая отчеты Всемирной организации охраны здоровья животных (*англ.* World Organization for Animal Health, WOAH), Научно-исследовательского института проблем биологической безопасности (НИИПББ), а также региональных ветеринарных служб. Дополнительно проанализированы новостные публикации и социальные медиа для выявления неподтвержденных случаев. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности ГИС-технологий в эпидемиологическом мониторинге и планировании противоэпидемических мероприятий. Выводы статьи могут быть полезны для органов здравоохранения, научных учреждений и специалистов в области эпидемиологии и геоинформатики.

# 1 Введение

Трансграничные заболевания представляют серьезную угрозу для эпидемиологической безопасности Казахстана, учитывая его стратегическое географическое положение, протяженные границы и активные торгово-экономические связи с соседними странами. Казахстан граничит с Россией, Китаем, Киргизией, Узбекистаном и Туркменистаном, что создает риски неконтролируемого распространения инфекционных заболеваний через миграционные потоки, транспортные коридоры и передвижение животных.

В последние годы наблюдается рост случаев зоонозных (бруцеллез, сибирская язва, бешенство), векторных (лихорадка Западного Нила, клещевой энцефалит) и респираторных (туберкулез, грипп, COVID-19) инфекций, что требует эффективных методов мониторинга и контроля [1]. Геоинформационные системы (ГИС) позволяют анализировать пространственно-временные закономерности распространения болезней, выявлять эпидемиологические очаги, оценивать влияние климатических и экологических факторов, а также прогнозировать вспышки заболеваний [2].

Наиболее востребованными для эпидемиологического мониторинга являются следующие ГИС:

- ArcGIS, QGIS, Eri Info — для пространственного анализа и картографирования вспышек заболеваний [3];
- Google Earth Engine — для обработки спутниковых данных и оценки изменений окружающей среды [4];
- HealthMap, GIDEON — специализированные платформы для моделирования эпидемиологических процессов и отслеживания инфекций в реальном времени [5].

Внедрение ГИС-технологий в систему эпидемиологического мониторинга Казахстана способствует повышению эффективности профилактических мер, оптимизации ресурсов здравоохранения и снижению рисков распространения трансграничных инфекций.

Оспа верблюдов и нодулярный дерматит были выбраны в качестве модельных трансграничных заболеваний, поскольку они представляют существенную эпидемиологическую и экономическую угрозу для животноводства Казахстана [6]. Оспа верблюдов создает особую опасность для Западного Казахстана в связи с высокой концентрацией поголовья верблюдов и их важностью для местного сельского хозяйства, а также из-за тесных миграционных и торговых связей со странами Центральной Азии. Нодулярный дерматит представляет серьезную угрозу для крупного рогатого скота, отличается высокой заразностью и быстрым распространением через границы, что обусловлено интенсивными торговыми потоками, транспортными коридорами и перемещением животных между соседними странами [7]. Изучение этих болезней с применением ГИС позволяет продемонстрировать преимущества такого подхода в мониторинге рисков трансграничного распространения инфекций и управлении этими рисками, а также эффективно планировать профилактические мероприятия и оптимизировать меры ветеринарного контроля.

Несмотря на растущий интерес к ГИС-технологиям, систематические исследования по картографированию трансграничных заболеваний в Казахстане ограничены, что подчеркивает актуальность настоящей работы.

Таким образом, исследование применения ГИС в картографировании трансграничных болезней является актуальной задачей для повышения эпидемиологической безопасности Казахстана, минимизации экономического ущерба и защиты здоровья населения. В настоящей статье представлены результаты картографирования оспы верблюдов и нодулярного дерматита в Западном Казахстане, выбранных в качестве модельных заболеваний ввиду их значительного распространения и экономического воздействия на регион. Целью работы является демонстрация эффективности ГИС-картографирования для мониторинга эпидемической ситуации, разработки превентивных стратегий и оптимизации ветеринарных мероприятий. Новизна исследования заключается

в интеграции данных дистанционного зондирования Земли и эпидемиологических наблюдений для выявления закономерностей распространения инфекций и оценки риска.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Область исследования

Исследование охватывает территории Атырауской и Мангыстауской областей Казахстана, где действует ряд факторов, способствующих распространению трансграничных заболеваний. Для этих регионов (рис. 1) характерны сухой и полупустынный климат, развитая нефтегазовая промышленность, активные миграционные процессы среди населения, торговля сельскохозяйственными животными.

**Рис. 1**  Область исследования. Базовый слой карты Sentinel-2, 10 м, LULC  
**Fig. 1** Study area. Base layer of Sentinel-2 map, 10 meters, LULC

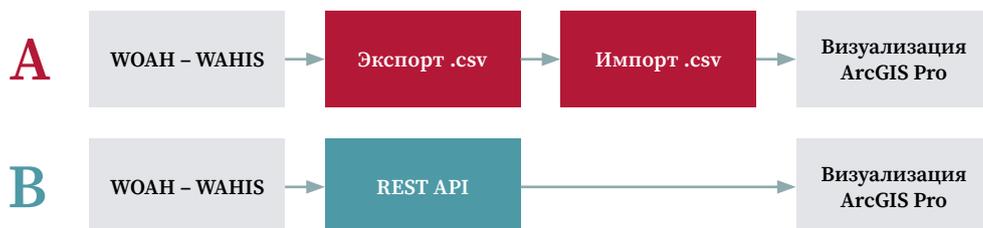


### 2.2 Сбор данных

#### 2.2.1 Нодулярный дерматит

В исследовании используется импорт данных Всемирной организации охраны здоровья животных (*англ.* World Organisation for Animal Health, WOAH) о трансграничных заболеваниях из Всемирной системы информации о здоровье животных (*англ.* World Animal Health Information System, WAHIS). Эти данные включают отчеты о вспышках болезней, эпизоотическую ситуацию, маршруты распространения инфекций и другие параметры, полезные для пространственного анализа. Для нодулярного дерматита рассматривается летний период 2016 года.

**Рис. 2**  Методы сбора данных  
**Fig. 2** Data collection methods



На рис. 2 показаны два типа сбора данных. Первый метод (A) предполагает использование стандартного фильтра работы с файлами CSV/Excel (выбрать страну, диапазон дат, вид животного и название болезни). Затем производится импорт файла в ArcGIS Pro “Add Data”. Для отображения географических координат (широта — Latitude, долгота — Longitude) использовали инструмент

Display XY Data (Data management). Второй метод (B) описан в статье [8]: прямое подключение из программной среды ArcGIS Pro с использованием REST API после запроса на базу, затем сохранение локально в шейп-формате для дальнейшего анализа данных.

Для визуализации плотности ядра был использован инструмент Kernel Density, далее с применением Reclassify (Spatial Analysis) оно было разделено на три класса. Для сглаживания была использована билинейная интерполяция (англ. Bilinear interpolation).

### 2.2.2 Оспа верблюдов

Для оперативного мониторинга и выявления вспышек трансграничных заболеваний были использованы новостные источники (Radio Azattyk), официальные сайты и агрегаторы данных типа ProMED / HealthMap [9]. Этот метод дополняет официальные отчеты и позволяет отслеживать неформальные сообщения о заболеваемости, особенно в удаленных районах<sup>1</sup>. Для оспы верблюдов рассматривался период с октября 2018 года по ноябрь 2019 года. Дополнительно была создана карта плотности популяции верблюдов для оценки пространственной корреляции между численностью животных и очагами вспышек заболевания.

## 2.3 Картографирование

Картографические выходные данные были разработаны с соблюдением принципов тематической ясности и визуальной иерархии<sup>2</sup>. Динамические элементы карты (например, масштабные линейки, легенды) были стандартизированы по всем макетам, а символы были адаптированы для выделения ключевых пространственных закономерностей, таких как градиенты в экологических метриках или плотность инфраструктуры [7, 8, 10, 11]. Используемая система координат — WGS 1984 UTM Zone 39N. Окончательные карты были экспортированы в высоком разрешении (1000 dpi) для публикации.

## 3 Результаты

### 3.1 Картографирование: нодулярный дерматит

Пространственный анализ распространения нодулярного дерматита в Атырауской области выявил четкие эпидемиологические очаги в пограничных с Астраханской областью России районах. На основе данных ВОАН были построены карты плотности заболеваемости, маршрутов распространения инфекции и летальности среди животных.

Результаты картографирования показали следующее. Первоначально инфекция появилась в Астраханской области, впоследствии она распространилась на территорию Казахстана. Основными очагами вспышки в Казахстане стали населенные пункты Курмангазы, Макаш и Орлы. Главными переносчиками заболевания являются насекомые-кровососы (комары, москиты, мухи), что способствует быстрому распространению инфекции в жаркий летний период.

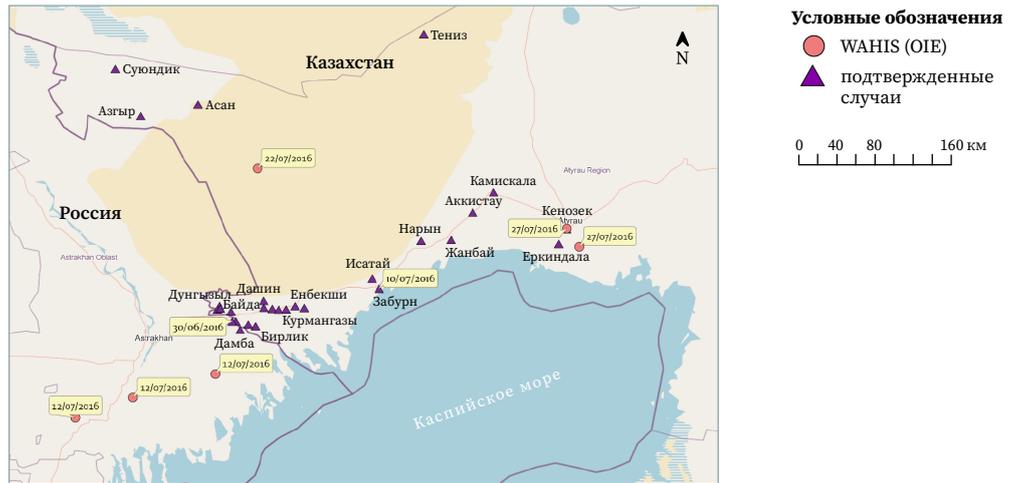
На рис. 3 представлены маршруты миграции инфекции, реконструированные на основе временных меток подтвержденных случаев заболевания. Красными кругами обозначены данные ВОАН, треугольниками — лабораторно

<sup>1</sup> Радио Азатлык: официальный сайт. 30 ноября 2018 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rus.azathabar.com/a/29629833.html> (дата обращения: 05.12.2024).

<sup>2</sup> Waikar V., Atulkar M., Ahirwal M.K. Basics of Geographic Information System (GIS). BP International, 2024. 137 p.

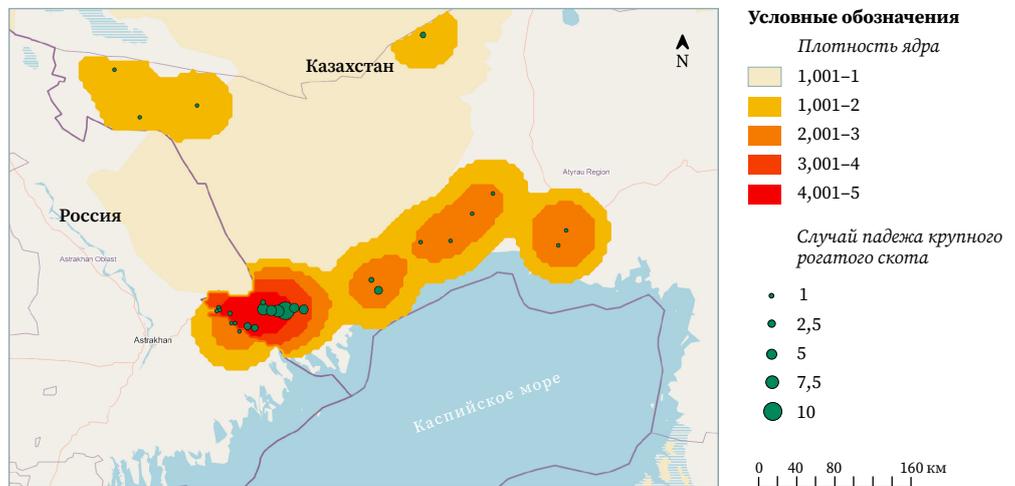
**Рис. 3**   
Карта распространения  
нодулярного дерматита  
(июнь – июль 2016 года)

**Fig. 3**  
Lumpy Skin Disease Distribution  
Map (June-July 2016)



**Рис. 4**   
Анализ плотности ядра  
инфекции нодулярного  
дерматита

**Fig. 4**  
Kernel density analysis of lumpy  
skin disease core



подтвержденные случаи от Научно-исследовательского института проблем биологической безопасности (НИИПББ).

Пространственный анализ плотности заболевания методом Kernel Density Estimation (рис. 4) показал, что основное эпидемиологическое ядро располагается в районе села Курмангазы, где также зафиксировано наибольшее число смертей среди животных.

Дополнительный анализ плотности восприимчивых животных позволил выделить зоны повышенного риска, где в случае новых вспышек потребуются оперативное вмешательство ветеринарных служб.

Эпицентр заражения находится в районе границы с Астраханской областью (Россия), откуда заболевание распространяется в сторону Казахстана. Вдоль границы между Астраханской и Атырауской областями сформировалось несколько очагов инфекции, что может указывать на возможные пути передачи. Высокая плотность случаев смерти ближе к основному очагу (красная зона) подтверждает активное распространение болезни.

В табл. 1 приведены статистические данные по числу заболевших и погибших животных, а также информация о восприимчивом поголовье и мерах лечения. Наибольшее число пораженных животных зафиксировано в Курмангазинском районе, что подтверждает необходимость усиленного мониторинга на этом участке границы. Из представленных данных следует, что наибольшее количество заболевших (514 случаев) и погибших (32 случая) животных зарегистрировано в селе Курмангазы. При этом наблюдается наибольшее распространение инфекции во множестве соседних населенных пунктов, где зарегистрированы случаи заболевания. В Исатайском районе также зафиксированы случаи заболевания, но их меньше, чем в Курмангазинском районе. В городе Атырау

**Таблица 1** 

Трекинг распространения нодулярного дерматита в Атырауской области Республики Казахстан

**Table 1**

Tracking the spread of Lumpy Skin Disease in Atyrau Region, Republic of Kazakhstan

случаи заболевания встречаются реже, но все же зарегистрированы в нескольких населенных пунктах. Общие данные по всем населенным пунктам (табл. 1) показывают, что всего в регионе было 150 смертей, 2828 заболевших и 63 318 восприимчивых животных. Количество выздоровевших составило 591, а прошедших лечение — 2087.

Эти данные использовались для построения карты, на которой показана пространственная плотность случаев заболевания (Kernel Density) и количество смертей (размер кругов).

Район / город	Населенный пункт	Широта, °	Долгота, °	Животные				
				Умершие	Заболевшие	Восприимчивые	Восстановившиеся	Прошедшие лечение
Курмангазинский	Курмангазы	46,6	49,266 666 67	32	514	3558	4	475
	Жумекен	46,620 277 78	49,349 444 44	12	192	3722	120	60
	Алга	46,609 444 44	49,436 666 67	12	250	3706	146	92
	Нуржау	46,603 611 11	49,136 666 67	15	293	1822	51	227
	Орлы	46,598 611 11	49,196 666 67	19	244	2224	28	197
	Тениз	48,35	50,55	5	172	1720	13	154
	Бирлик	46,491 388 89	48,980 277 78	7	188	1296	50	131
	Хиуаз	46,610 833 33	49,058 333 33	17	224	4207	40	167
	Бокейхан	46,585	48,752 222 22	2	46	1511	—	44
	Кудряшово	46,521 111 11	48,796 666 67		71	1498	13	58
	Акколь	46,655	49,057 222 22	3	78	1762	10	65
	Сафоновка	46,501 944 44	48,913 333 33	8	54	1357	13	33
	Жыланды	46,621 944 44	48,643 888 89	1	56	2653	9	46
	Коптогай	46,600 555 56	48,625 555 56		9	837	2	7
	Шортанбай	46,606 388 89	48,652 777 78	1	11	889	6	4
	Кигач	46,520 833 33	48,763 055 56	—	—	516	—	—
	Асан	47,907 222 22	48,442 777 78	—	—	4134	—	—
Азгир	47,835 277 78	47,908 888 89	—	—	4298	—	—	
Суюндук	48,132 222 22	47,673 888 89	—	—	7204	—	—	
Исатайский	Исатай	46,798 055 56	50,068 611 11	3	120	990	32	85
	Зинеден	46,733 333 33	50,133 333 33	10	244	1467	49	185
	Жанбай	47,048 333 33	50,805 277 78	—	4	2661	2	2
	Нарын	47,040 833 33	50,525 555 56	—	15	1808	3	12
	Аккистау	47,223 611 11	51,006 388 89	—	2	1658	—	2
	Хамита Ергалиева	47,352 777 78	51,200 833 33	—	4	3502	—	4
Атырау	Дамба	46,468 333 33	48,837 777 78	—	1	164	—	1
	Кенозек	47,116 666 67	51,883 333 33	3	24	788	—	24
	Еркинкала	47,021 111 11	51,808 055 56	—	8	685	—	8
	Атырау	47,116 666 67	51,883 333 33	—	4	681	—	4
				150	2828	63 318	591	2087

### 3.2 Картографирование: оспа верблюдов

Пространственный анализ случаев оспы верблюдов показал, что инфекция предположительно проникла в Казахстан из Туркменистана в период с октября 2018 года по ноябрь 2019 года. На рис. 5 представлена реконструкция распространения заболевания. Первые случаи были зафиксированы в этрапе Этрек (Туркменистан) в октябре 2018 года. В ноябре 2018 года болезнь распространилась на северо-запад Балканского велаята Туркменистана. В июне 2019 года вспышка зарегистрирована в Мангистауской области Казахстана. В августе 2019 года болезнь распространилась дальше на север, достигнув района Бейнеу. Маршрут распространения заболевания пролегал вдоль побережья Каспийского моря, проходя через пастбищные зоны и пути миграции верблюдов. Направление распространения: с юга (Туркменистан) на север (Казахстан). К вероятным факторам распространения относится миграция верблюдов, т. е. перемещение инфицированных особей между регионами. Торговые пути также являются вероятным фактором (через рынки и скотные дворы). Климатические условия благоприятны для выживания вируса (жаркий и засушливый климат). Пастбищная система содержания способствует передаче вируса (через контакт с зараженными животными).

Карта, представленная на рис. 5, показывает четкую цепочку распространения оспы верблюдов из Туркменистана в Казахстан, что свидетельствует о необходимости мониторинга поголовья, ветеринарного контроля на границах и профилактических мер в регионах, подверженных риску.

Карта, приведенная на рис. 6, демонстрирует плотность (количество голов верблюда на квадратный километр) популяции верблюдов (оттенки синего и зеленого цветов) и случаи заболевания оспой верблюдов (красные точки с указанием месяца и года). Градация плотности составляет от 0,06 (306 голов) до 0,55 (14 551 голов) голов на квадратный километр. Самая высокая плотность (темно-синий цвет) характерна для Тупкараганского (0,55) и Исатайского (0,37) районов в западной части региона исследования (Атырауская и Мангистауская области). Наименьшая плотность (светло-зеленые зоны) наблюдается в Атырауской области и южных районах — Мангистауском, Бейнеуском (отмечены красными точками с указанием месяца и года).

Зафиксированы случаи оспы верблюдов (табл. 2) в июне, августе и ноябре 2019 года. Очаги заболевания располагаются в регионах со средней и высокой плотностью популяции верблюдов [12]. Высокая плотность может коррелировать с очагами вспышек оспы. Возможно, это связано с тесным контактом животных, что способствует распространению вируса.

**Таблица 2** ↻

Временная и пространственная динамика распространения оспы верблюдов, включая координаты зафиксированных случаев

**Table 2**

Temporal and spatial dynamics of the spread of camelpox, including the coordinates of recorded cases

Период	Локация	Широта, м	Долгота, м
Июнь 2019 г.	Каракиянский район, Казахстан	5 981 107,482	5 231 736,86
Август 2019 г.	Мангистауский район, Казахстан	5 931 007,313	5 449 192,916
Август 2019 г.	Мунайлинский район, Казахстан	5 761 519,505	5 401 224,668
Ноябрь 2019 г.	Тупкараганский район, Казахстан	5 681 572,426	5 497 161,163
Ноябрь 2018 г.	Балканабад, Туркменистан	6 051 321,477	4 795 981,965
Ноябрь 2018 г.	Мадав, Туркменистан	6 094 187,157	4 599 033,705
Октябрь 2018 г.	Эртек, Туркменистан	6 095 975,767	4 531 786,231

**Рис. 5**

Распространение оспы верблюдов с территории Туркменистана на Мангистаускую область Казахстана в 2018–2019 гг.

**Fig. 5**

Spread of camel pox from Turkmenistan to the Mangistau region of Kazakhstan in the period from 2018 to 2019



**Условные обозначения**  
 Оспа верблюдов

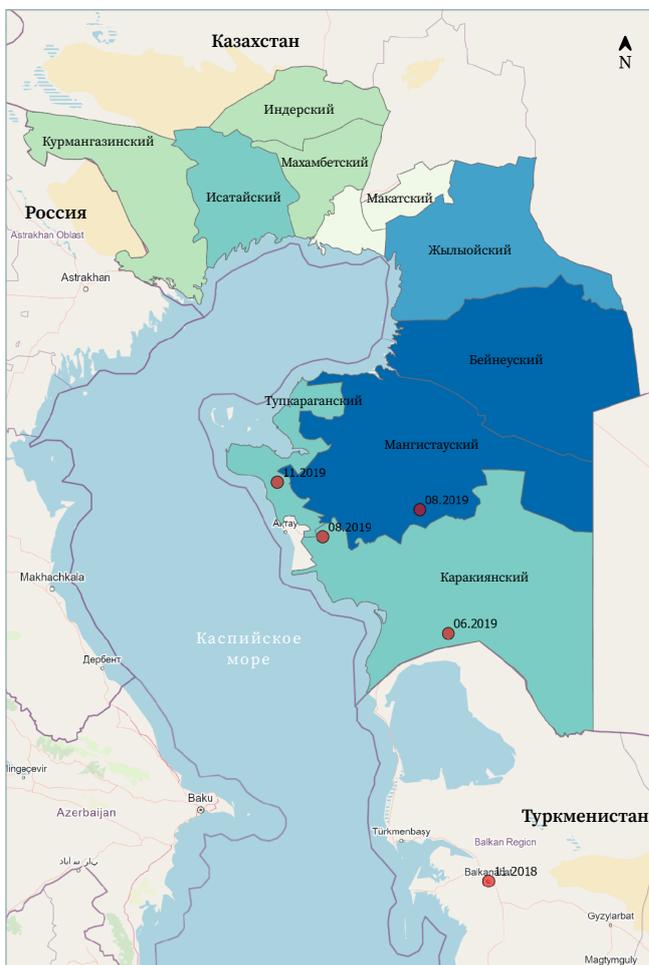
0 95 190 380 км

**Рис. 6**

Плотность популяции верблюдов

**Fig. 6**

Camel population density



**Условные обозначения**  
 Плотность популяции верблюдов, голов на км<sup>2</sup>

- 306–520
- 520–4307
- 4307–6124
- 6124–7955
- 7955–14 551

Оспа верблюдов

0 85 170 340 км

## 4 Обсуждение

Трансграничные заболевания животных характеризуются высокой заразностью и способностью быстро преодолевать государственные границы, что делает их мониторинг и контроль сложными задачами [13]. Урбанизация, вырубка лесов, климатические изменения, рост населения, увеличение мобильности людей и развитие животноводства приводят к тому, что животные все чаще обитают рядом с человеком. В результате зоонозные инфекции передаются людям с возрастающей частотой и могут распространяться в течение нескольких часов или дней. ГИС играют ключевую роль в мониторинге трансграничных заболеваний, таких как нодулярный дерматит [14], ящур, бруцеллез и птичий

грипп, и управлении ими [15]. Эти болезни распространяются между странами через миграцию животных, торговлю скотом, антропогенные перемещения, под влиянием климатических факторов. К преимуществам картографирования трансграничных заболеваний относятся выявление и прогнозирование очагов распространения. Картографический анализ позволяет определить зоны риска, горячие точки вспышек и оценить влияние природных и социальных факторов на распространение болезни [16].

В последние десятилетия глобализация, урбанизация, изменения климата и интенсификация животноводства привели к увеличению частоты вспышек инфекций, передающихся между странами [14]. В данном исследовании показано, что применение геоинформационных систем существенно повышает эффективность выявления, прогнозирования и контроля трансграничных заболеваний, таких как нодулярный дерматит и оспа верблюдов.

Результаты картографирования показали, что очаги нодулярного дерматита концентрируются в пограничных с Россией районах [17], что указывает на необходимость межгосударственного обмена данными. Анализ плотности случаев заболевания выявил основные зоны риска в Курмангазинском районе, где пересечение транспортных коридоров и природные факторы способствуют активному распространению инфекции [15].

Случаи оспы верблюдов продемонстрировали важность мониторинга неофициальных источников информации. Анализ данных СМИ и социальных медиа позволил выявить угрозу в Туркменистане еще до ее официального подтверждения в Казахстане. Это доказывает, что дополнение традиционных методов сбора данных альтернативными источниками может значительно повысить оперативность реагирования ветеринарных служб.

ГИС-технологии позволяют не только анализировать прошлые вспышки заболеваний, но и разрабатывать предиктивные модели для оценки будущих рисков. Например, использование многослойного анализа (эпидемиологические, метеорологические, демографические данные) дает возможность определить территории с наибольшей вероятностью новых вспышек. Применение картографического моделирования помогает определить оптимальные маршруты вакцинации и карантинных зон, снижая риски дальнейшего распространения инфекции. Данные о плотности поголовья восприимчивых животных в сочетании с климатическими параметрами [18] могут использоваться для сезонного прогнозирования вспышек, что особенно актуально в отношении инфекций, передающихся через насекомых [16].

Результаты исследования подчеркивают необходимость усиления международного обмена данными о трансграничных заболеваниях. Казахстан, Россия и Туркменистан могли бы разработать единую ГИС-платформу [19], в которой бы оперативно обновлялись сведения о вспышках болезней. Это позволило бы скоординировать усилия по борьбе с инфекциями, улучшить контроль за миграцией животных и снизить экономические потери. Кроме того, внедрение инициатив ООН и ФАО в рамках концепции «Единое здоровье» (*англ. One Health*) может способствовать эффективной борьбе с трансграничными инфекциями [20]. Например, программы Чрезвычайного центра по трансграничным заболеваниям животных (*англ. Emergency Centre for Transboundary Animal Diseases, ECTAD*) ежегодно предотвращают более 400 вспышек приоритетных болезней по всему миру.

В целом сопоставление полученных результатов с данными зарубежных исследований подчеркивает, что аналогичные маршруты распространения нодулярного дерматита наблюдаются не только в Казахстане, но и в других регионах с интенсивными трансграничными миграционными процессами. Применение ГИС-технологий в данном исследовании демонстрирует высокую эффективность в выявлении и прогнозировании зон риска, что соответствует мировым трендам в эпидемиологическом мониторинге [7, 14, 17]. Такой сравнительный анализ усиливает научную значимость работы и открывает перспективы для дальнейшей интеграции данных из различных источников с целью повышения эпидемиологической безопасности в Центральной Азии.

## 5 Выводы

Применение ГИС в мониторинге трансграничных заболеваний в Казахстане продемонстрировало высокую эффективность. Геоинформационные системы позволили выявить пространственно-временные закономерности распространения инфекций, оценить зоны риска и поддержать решения, принимаемые ветеринарными службами. Детализированный анализ маршрутов распространения показал, что основными эпидемиологическими очагами нодулярного дерматита являются пограничные с Россией районы, где высок риск проникновения инфекции через миграцию скота и насекомых-переносчиков. Вспышка оспы верблюдов подчеркнула значимость использования альтернативных источников информации (новостные публикации, социальные медиа) для раннего выявления угроз.

Методика ГИС-анализа, включающая использование Kernel Density Estimation и многослойного анализа данных (эпидемиологических, климатических, демографических), позволила выделить зоны наибольшего риска, совпадающие с регионами высокой плотности восприимчивого поголовья. Картографирование маршрутов миграции выявило ключевые транспортные коридоры, способствующие распространению инфекций. Пространственный анализ указал на критические точки, где необходимы профилактические меры, включая усиление контроля за миграцией скота и ужесточение ветеринарных проверок (в частности, в Курмангазинском районе и Мангистауской области). ГИС-картографирование может служить основой для разработки стратегий кольцевой вакцинации и определения оптимальных зон карантина.

Представляется целесообразным создание единой цифровой платформы мониторинга трансграничных инфекций в Центральной Азии, обеспечивающей эффективный обмен данными между странами. Казахстан, Россия и Туркменистан могут использовать совместную ГИС-систему, интегрированную с базами данных ВОАН и национальными ветеринарными службами.

Практическая значимость исследования заключается в универсальности предложенной методологии: она может быть применена для мониторинга других трансграничных заболеваний, таких как бруцеллез, ящур, птичий грипп. Использование ГИС для прогнозирования вспышек способствует снижению экономических потерь и повышению эпидемиологической безопасности. Полученные результаты могут стать основой для разработки автоматизированных систем раннего предупреждения на базе машинного обучения и анализа больших данных.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку интерактивных ГИС-платформ для визуализации эпидемиологических рисков в реальном времени, а также на использование спутниковых данных и дистанционного зондирования Земли для анализа влияния климатических факторов. Важным направлением также является интеграция ГИС с мобильными приложениями, обеспечивающими мониторинг вспышек и оперативное оповещение ветеринарных служб.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив Зональной диагностической лаборатории НИИПБВ за техническую поддержку, предоставление эпидемиологических данных и содействие в организации полевых исследований. Профессионализм и научная экспертиза сотрудников лаборатории значительно повлияли на качество и результаты данной работы.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Sharma B., Agrawal I. Surveillance of Veterinary and Human Health in Pertaining Risk Analysis of Zoonoses Throughout the Globe // *The Handbook of Zoonotic Diseases of Goats* / T. Rana (ed.). CAB International, 2024. P. 66–82.
2. José Becerra M., Araujo Bernardino Da Rocha M. Applications of Geotechnologies in the Field of Public Health // *Geographic Information Systems – Data Science Approach* / R. Abdalla (ed.). IntechOpen, 2024. P. 185–211. DOI:10.5772/intechopen.1003867.
3. Azewan M.D.H., Abdul Rasam A.R. Disease Mapping and Health Analysis Using Free and Open Source Software for Geospatial (FOSS4G): An Exploratory Qualitative Study

- of Tuberculosis // Charting the Sustainable Future of ASEAN in Science and Technology / N.Z. Alias, R. Yusof (ed.). Singapore: Springer Singapore, 2020. P. 495–506. DOI:10.1007/978-981-15-3434-8\_43.
4. Monir N., Abdul Rasam A., Ghazali R., et al. Address Geocoding Services in Geospatial-based Epidemiological Analysis: A Comparative Reliability for Domestic Disease Mapping // International Journal of Geoinformatics. 2021. Vol. 17. No. 5. P. 156–166. DOI:10.52939/ijg.v17i5.2029.
  5. Edberg S.C. Global Infectious Diseases and Epidemiology Network (GIDEON): A World Wide Web-Based Program for Diagnosis and Informatics in Infectious Diseases // Clinical Infectious Diseases. 2005. Vol. 40. No. 1. P. 123–126. DOI:10.1086/426549.
  6. Пунтус И.А., Бабак В.А. Нодулярный дерматит (обзор) // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Биологические науки. 2021. Т. 134. № 1. С. 46–59. DOI:10.32523/2616-7034-2021-134-1-46-59.
  7. Tuppurainen E.S.M., Oora C.A.L. Review: Lumpy Skin Disease: An Emerging Threat to Europe, the Middle East and Asia: Emerging Lumpy Skin Disease // Transboundary and Emerging Diseases. 2012. Vol. 59. No. 1. P. 40–48. DOI:10.1111/j.1865-1682.2011.01242.x.
  8. Leray L.S.G., Ward M.P. Web-scraping applied to acquire difficult to access animal disease outbreak information, using African Swine Fever in Europe as an example // Transboundary and Emerging Diseases. 2021. Vol. 68. No. 5. P. 2795–2805. DOI:10.1111/tbed.14133.
  9. Freifeld C.C., Mandl K.D., Reis B.Y., et al. HealthMap: Global Infectious Disease Monitoring through Automated Classification and Visualization of Internet Media Reports // Journal of the American Medical Informatics Association. 2008. Vol. 15. No. 2. P. 150–157. DOI:10.1197/jamia.M2544.
  10. Justová P., Cajthaml J. Cartographic Design and Processing of Originally Printed Historical Maps for Their Presentation on the Web // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023. Vol. 12. No. 6. P. 230. DOI:10.3390/ijgi12060230.
  11. Nelson J.K. Cartography & geovisual analytics in personal contexts: designing for the data creator // International Journal of Cartography. 2023. Vol. 9. No. 2. P. 210–230. DOI:10.1080/23729333.2023.2189431.
  12. Bulatov Y., Turyskeldy Sh., Abitayev R., et al. Camel痘 Virus in Western Kazakhstan: Assessment of the Role of Local Fauna as Reservoirs of Infection // Viruses. 2024. Vol. 16. No. 10. P. 1626. DOI:10.3390/v16101626.
  13. Singh S. Transboundary, Emerging, and Exotic Diseases of Goats // Principles of Goat Disease and Prevention / T. Rana (ed.). Hoboken: Wiley Blackwell, 2023. P. 137–154. DOI:10.1002/9781119896142.ch11.
  14. Moudgil G., Chadha J., Khullar L., et al. Lumpy skin disease: Insights into current status and geographical expansion of a transboundary viral disease // Microbial pathogenesis. 2024. Vol. 186. P. 106485. DOI:10.1016/j.micpath.2023.106485.
  15. Зарва И.Д., Павлов М.В., Сороковой А.А. и др. Применение ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли для оценки пространственно-временного распространения бешенства в Восточном Забайкалье // Проблемы особо опасных инфекций. 2021. Т. 2. С. 100–107. DOI:10.21055/0370-1069-2021-2-100-107.
  16. Kiani B., Lau C., Bergquist R. From Snow's map of cholera transmission to dynamic catchment boundary delineation: current front lines in spatial analysis // Geospatial Health. 2023. Vol. 18. No. 2. P. 1–12. DOI:10.4081/gh.2023.1247.
  17. Byadovskaya O., Prutnikov P., Shalina K. The changing epidemiology of lumpy skin disease in Russia since the first introduction from 2015 to 2020 // Transboundary and Emerging Diseases. 2022. Vol. 69. No. 5. P. 2551–2562. DOI:10.1111/tbed.14599.
  18. Liao H., Lyon C.J., Ying B., et al. Climate change, its impact on emerging infectious diseases and new technologies to combat the challenge // Emerging Microbes and Infections. 2024. Vol. 13. No. 1. P. 2356143. DOI:10.1080/22221751.2024.2356143.
  19. Carroll L.N., Au A.P., Detwiler L.T., et al. Visualization and analytics tools for infectious disease epidemiology: A systematic review // Journal of Biomedical Informatics. 2014. Vol. 51. P. 287–298. DOI:10.1016/j.jbi.2014.04.006.
  20. Iannetti S., Savini L., Palma D. An integrated web system to support veterinary activities in Italy for the management of information in epidemic emergencies // Preventive Veterinary Medicine. 2014. Vol. 113. No. 4. P. 407–416. DOI:10.1016/j.prevetmed.2014.01.015.

**АВТОРЫ** **Раметов Нуркуйса Мирзабекович**

Институт ионосферы, Алма-Ата, Казахстан;  
Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева, Алма-Ата, Казахстан  
кафедра маркшейдерского дела и геодезии, Горно-металлургический институт  
имени О.А. Байконурова  
 0000-0002-8346-4147

**Табынов Кайрат Казыбаевич**

 kairat.tabynov@gmail.com  
Казахский национальный аграрный исследовательский университет,  
Алма-Ата, Казахстан  
Международный центр вакцинологии  
канд. вет. наук, доцент  
 0000-0001-9411-7952

**Байгурин Жаксыбек Джакупбекович**

 zh.baygurin@satbayev.university  
Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева, Алма-Ата, Казахстан  
кафедра маркшейдерского дела и геодезии, Горно-металлургический институт  
имени О.А. Байконурова  
д-р техн. наук, профессор  
 0000-0002-6958-0707

Поступила 13.01.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Mapping transboundary diseases in Kazakhstan using GIS technologies

**Nurkuisa M. Rametov<sup>1,2</sup>**✉, **Kairat K. Tabynov<sup>3</sup>**,  
**Zhaksybek J. Baigurin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup> Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup> Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan

✉ nurkuisa.rametov@gmail.com

**CITATION** Rametov NM, Tabynov KK, Baigurin ZhJ. Mapping transboundary diseases in Kazakhstan using GIS technologies. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 94–108. DOI:10.30533/GiA-2025-047.

**KEYWORDS** cartography, GIS, epidemiology, spatial analysis, transboundary diseases, Kazakhstan, geomonitoring

**ABSTRACT** In the modern world, the spread of transboundary diseases poses a significant threat to public health, especially in regions with high migration activity and complex environmental conditions. This study employs geoinformation technologies to map transboundary diseases in Kazakhstan. Case studies include outbreaks of lumpy skin disease (2016) and camelpox (2018–2019). The study areas are located in the Atyrau and Mangystau regions of Kazakhstan and adjacent regions of Russia and Turkmenistan. Data was collected from official sources, including reports from the World Organization for Animal Health (WOAH), the Research Institute for Biological Safety Problems (RIBSP), and regional veterinary services. Additionally, news publications and social media were analyzed to identify unconfirmed cases. The results demonstrate the effectiveness of GIS technologies in epidemiological monitoring and in planning disease control measures. The findings of this study may be useful for public health authorities, research institutions, and professionals in the fields of epidemiology and geoinformatics.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The authors would like to thank the team of the Zonal Diagnostic Laboratory of RIBSP for their technical support, provision of epidemiological data and assistance in organizing field studies. Their professionalism and scientific expertise contributed significantly to the quality and results of this work.

- REFERENCES**
1. Sharma B, Agrawal I. Surveillance of Veterinary and Human Health in Pertaining Risk Analysis of Zoonoses Throughout the Globe. *The Handbook of Zoonotic Diseases of Goats*. Rana T (ed.). CAB International, 2024: 66–82.
  2. José Becerra M, Araujo Bernardino Da Rocha M. Applications of Geotechnologies in the Field of Public Health. *Geographic Information Systems – Data Science Approach*. Abdalla R (ed.). IntechOpen, 2024: 185–211. DOI:10.5772/intechopen.1003867.
  3. Azewan MDH, Abdul Rasam AR. Disease Mapping and Health Analysis Using Free and Open Source Software for Geospatial (FOSS4G): An Exploratory Qualitative Study of Tuberculosis. *Charting the Sustainable Future of ASEAN in Science and Technology*. Alias NZ, Yusof R (ed.). Singapore: Springer Singapore; 2020: 495–506. DOI:10.1007/978-981-15-3434-8\_43.
  4. Monir N., Abdul Rasam A., Ghazali R., et al. Address Geocoding Services in Geospatial-based Epidemiological Analysis: A Comparative Reliability for Domestic Disease Mapping. *International Journal of Geoinformatics*. 2021;17(5): 156–166. DOI:10.52939/ijg.v17i5.2029.
  5. Edberg SC. Global Infectious Diseases and Epidemiology Network (GIDEON): A World Wide Web-Based Program for Diagnosis and Informatics in Infectious Diseases. *Clinical Infectious Diseases*. 2005;40(1): 123–126. DOI:10.1086/426549.
  6. Puntus IA, Babak VA. Noduljarnyj dermatit (obzor) [Nodular dermatitis (review)]. *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Bioscience Series*. 2021;134(1): 46–59. (In Russian). DOI:10.32523/2616-7034-2021-134-1-46-59.
  7. Tuppurainen ESM, Oura CAL. Review: Lumpy Skin Disease: An Emerging Threat to Europe, the Middle East and Asia: Emerging Lumpy Skin Disease. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2012;59(1): 40–48. DOI:10.1111/j.1865-1682.2011.01242.x.
  8. Leray LSG, Ward MP. Web-scraping applied to acquire difficult to access animal disease outbreak information, using African Swine Fever in Europe as an example. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2021;68(5): 2795–2805. DOI:10.1111/tbed.14133.
  9. Freifeld CC, Mandl KD, Reis BY, et al. HealthMap: Global Infectious Disease Monitoring through Automated Classification and Visualization of Internet Media Reports. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2008;15(2): 150–157. DOI:10.1197/jamia.M2544.
  10. Justová P., Cajthaml J. Cartographic Design and Processing of Originally Printed Historical Maps for Their Presentation on the Web. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023;12(6): 230. DOI:10.3390/ijgi12060230.
  11. Nelson JK. Cartography & geovisual analytics in personal contexts: designing for the data creator. *International Journal of Cartography*. 2023;9(2): 210–230. DOI:10.1080/23729333.2023.2189431.
  12. Bulatov Y, Turyskeldy Sh, Abitayev R, et al. Camel pox Virus in Western Kazakhstan: Assessment of the Role of Local Fauna as Reservoirs of Infection. *Viruses*. 2024;16(10): 1626. DOI:10.3390/v16101626.
  13. Singh S. Transboundary, Emerging, and Exotic Diseases of Goats. *Principles of Goat Disease and Prevention*. Rana T (ed.). Hoboken: Wiley Blackwell; 2023: 137–154. DOI:10.1002/9781119896142.ch11.
  14. Moudgil G, Chadha J, Khullar L, et al. Lumpy skin disease: Insights into current status and geographical expansion of a transboundary viral disease. *Microbial pathogenesis*. 2024;186: 106485. DOI:10.1016/j.micpath.2023.106485.
  15. Zarva ID, Pavlov MV, Sorokovoi AA, et al. Primenenie GIS-tekhnologij i dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli dlya ocenki prostranstvenno-vremennogo rasprostraneniya beshenstva v Vostochnom Zabajkal'e [Application of GIS and Earth Remote Sensing Data for the Evaluation of the Spatiotemporal Spread of Rabies in Eastern Trans-Baikal Region]. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2021;2: 100–107. (In Russian). DOI:10.21055/0370-1069-2021-2-100-107.
  16. Kiani B, Lau C, Bergquist R. From Snow's map of cholera transmission to dynamic catchment boundary delineation: current front lines in spatial analysis. *Geospatial Health*. 2023;18(2): 1–12. DOI:10.4081/gh.2023.1247.
  17. Byadovskaya O, Prutnikov P, Shalina K. The changing epidemiology of lumpy skin disease in Russia since the first introduction from 2015 to 2020. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2022;69(5): 2551–2562. DOI:10.1111/tbed.14599.

18. Liao H, Lyon CJ, Ying B, et al. Climate change, its impact on emerging infectious diseases and new technologies to combat the challenge. *Emerging Microbes and Infections*. 2024;13(1): 2356143. DOI:10.1080/22221751.2024.2356143.
19. Carroll LN, Au AP, Detwiler LT, et al. Visualization and analytics tools for infectious disease epidemiology: A systematic review. *Journal of Biomedical Informatics*. 2014;51: 287–298. DOI:10.1016/j.jbi.2014.04.006.
20. Iannetti S, Savini L, Palma D. An integrated web system to support veterinary activities in Italy for the management of information in epidemic emergencies. *Preventive Veterinary Medicine*. 2014;113(4): 407–416. DOI:10.1016/j.prevetmed.2014.01.015.

**AUTHORS** **Nurkuisa M. Rametov**

Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan;  
Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,  
Almaty, Kazakhstan  
Department of Surveying and Geodesy, Mining and Metallurgical Institute  
named after O.A. Baikonurov  
 0000-0002-8346-4147

**Kairat K. Tabynov**

 kairat.tabynov@gmail.com  
Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan  
International Center for Vaccinology  
PhD in Veterinary Medicine, Associate Professor  
 0000-0001-9411-7952

**Zhaksybek Zh. Baygurin**

 zh.baygurin@satbayev.university  
Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,  
Almaty, Kazakhstan  
Department of Surveying and Geodesy, Mining and Metallurgical Institute  
named after O.A. Baikonurov  
Dr. of Sci. (Engineering), Professor  
 0000-0002-6958-0707

Submitted: January 13, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Картографические приемы для реализации функций социального картографирования

**Л.К. Радченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
Новосибирск, Россия  
 l.k.radchenko@sgugit.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Радченко Л.К. Картографические приемы для реализации функций социального картографирования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 109–121. DOI:10.30533/GiA-2025-034.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** социальное картографирование, функции социального картографирования, социальные геознания, учебные карты, познавательные картографические продукты, патриотические карты, пропагандистские карты, туристские карты, картографические игры

**АННОТАЦИЯ** В статье рассматривается растущий интерес к вопросам социального картографирования. Приведены различные определения социального картографирования с целью уточнения этого понятия как раздела тематического картографирования в части отображения социальных объектов, процессов и явлений. Выделены виды социальной деятельности с точки зрения передачи социальных геознаний с помощью географических карт. Определены функции социального картографирования через учебно-образовательный, познавательный, туристский, патриотический, пропагандистский и игровой виды деятельности. Предлагается реализация перечисленных видов деятельности соответственно с помощью учебных, познавательных, туристских, патриотических, пропагандистских карт и картографических игр. Определено понятие картографических приемов как совокупности использованных способов картографического изображения объектов и явлений, различных шкал, всевозможных видов инфографики, различных графических приемов, выбора картографической проекции и процедуры генерализации. Для каждого вида картографической продукции выявлены и обозначены применяемые картографические приемы, выделены особенности содержания. Выявленные и обоснованные картографические приемы в дальнейшем могут применяться для формирования научно-методических основ социального картографирования, а также для разработки и создания новых типов карт социальной направленности.

## 1 Введение

В настоящее время в ведущих странах мира на национальном уровне отмечается растущая значимость геопространственной информации и знаний для обеспечения экономики и социальной сферы, что обусловлено всеобщей цифровизацией и условиями четвертой промышленной революции. При этом акцент смещается с деятельности по обеспечению страны геодезической и картографической информацией на деятельность по созданию и функционированию среды, обеспечивающей экономику и общество геопространственными данными и знаниями [1]. Большая часть населения уже вовлечена в этот процесс и активно использует сервис геолокации для определения координат объектов, карты познавательного туризма — для путешествий, познавательные карты — для получения знаний об уникальных объектах. Более того, люди не только пользуются готовыми картами, но и сами участвуют в создании и обновлении картографических произведений. Все это говорит об активном вовлечении широкого круга пользователей в индустрию социальных геознаний. Данные процессы оказывают влияние на модификацию социального картографирования [2]. Социум, участвуя в этой модификации, использует различные картографические практики, в основе которых лежит картографический язык.

Картографический язык — это одно из важнейших средств современной коммуникации, один из самых объемных и значимых культурно-исторических, цивилизационных феноменов. Картографический язык имеет большое познавательное, мировоззренческое, идеологическое значение, а выраженная им карта — это уникальная форма организации знания и источник нового знания [3].

Цель данного исследования состоит в том, чтобы разобраться, какие картографические приемы становятся инструментами для реализации той или иной функции социального картографирования в части передачи знаний.

## 2 Материалы и методы

Возросший интерес пользователей и ученых-картографов к социальному картографированию дает возможность с разных сторон взглянуть на этот процесс. В научных работах можно найти разные его определения.

1. Социальное картографирование можно в достаточно общем виде определить как метод фиксации особенностей расположения различных социальных объектов на территориях посредством социальных карт [4].
2. Некоторые исследователи рассматривают социальное картографирование как интерактивный подход, который предлагает участникам составить карту своих социальных отношений с различными людьми или сообществами<sup>1</sup>. В рамках данной концепции социальное картографирование — это метод моделирования, визуализации и графического представления любой пространственно локализованной информации в соответствии с целью получения знаний о представленных явлениях.
3. В работе [5] освещается несколько подходов к определению социального картографирования. Так, оно может рассматриваться как метод:
  - 3.1) моделирования графического и цифрового изображения для геоинформационных систем и геопространственной информации с идентификацией координатных и атрибутивных данных;

<sup>1</sup> Social mapping overview / IASC MHPSS Reference Group, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mhpss.net/toolkit/mhpss-m-and-e-mov-toolkit/resource/social-mapping-overview> (дата обращения: 13.02.2025).

- 3.2) моделирования, визуализации и графического представления любых пространственно локализованных объектов и явлений с целью получения знаний о представленных явлениях;
- 3.3) графического и семантического описания любого материального и абстрактного объекта, которое позволяет последовательно описывать, группировать и обобщать данные.

Социальное картографирование фиксирует вариативные особенности территории (социальные проблемы, группы взаимодействия, социальное благосостояние и т. д.) с помощью социальных карт, включает в себя сложный многофакторный анализ любого социального явления (например, уровень безопасности на определенной территории, уровень безработицы, осведомленности об экологических проблемах), что, в свою очередь, обуславливает создание многослойных интерактивных карт.

Для определения понятия «социальное картографирование», учитывая материал статьи [6], обратимся к понятию «картографирование». ГОСТ 21667-76 обозначает картографирование как «комплекс мероприятий по созданию карты или ряда карт какой-либо области» (под областью подразумевается «любое пространство: территория, акватория, небесное тело, космическое пространство»)<sup>2</sup>, тогда тематическое картографирование — это комплекс мероприятий по созданию карт и атласов определенной тематики, а социальное картографирование — это раздел тематического картографирования в части отображения социальных объектов, процессов и явлений.

В качестве материалов исследования применены ранее изданные картографические продукты социальной направленности, заявленные как учебные, познавательные карты, карты познавательного туризма, патриотические, пропагандистские и карты, которые используются в игровой деятельности для познания окружающего мира и обучения.

### 3 Результаты и обсуждение

В социологии в зависимости от характера отношения к окружающему миру и взаимодействия человека с другими людьми социальная деятельность подразделяется на несколько видов: материально-преобразовательную, познавательную, ценностно-ориентационную, коммуникативную, информационную, художественную, оздоровительную, спортивную, политическую, управленческую и природную<sup>3</sup>.

С точки зрения передачи социальных геознаний с помощью географических карт можно выделить другие виды социальной деятельности, например: учебно-образовательную, познавательную, патриотическую, туристскую, пропагандистскую и т. д. Тогда к функциям социального картографирования относится картографическое обеспечение этих видов социальной деятельности, связанных с передачей знаний по картам, а именно:

- 1) учебно-образовательной деятельности;
- 2) познавательной деятельности;
- 3) патриотической деятельности;
- 4) туристской деятельности;
- 5) пропагандистской деятельности;
- 6) игровой деятельности.

Реализация функций социального картографирования происходит с помощью использования тематических карт. Рассмотрим подробно, какие карты используются для этого и какие картографические приемы применяются.

<sup>2</sup> ГОСТ 21667-76. Картография. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 2002. С. 2.

<sup>3</sup> Методическое руководство к проведению лекционных и семинарских занятий по курсу «Социология»: в 3 ч. Краснодар: КубГАУ, 2013. Ч. 1. 137 с.

При этом под картографическими приемами будем понимать совокупность использованных способов картографического изображения объектов и явлений, различных шкал, всевозможные виды инфографики, различные графические приемы, выбор картографической проекции и процедуру генерализации.

### 3.1 Учебные карты

При учебно-образовательном виде деятельности применяются учебные карты. Учебные карты — это большая группа карт, предназначенных для обучения и передачи знаний широкому кругу лиц во всех образовательных учреждениях. Такие карты используются в качестве наглядного пособия при подаче материала, самостоятельной подготовке учащихся и проверке знаний. Главная цель учебных карт — осуществление помощи при изучении какой-либо науки.

К особенностям таких карт относят:

- соответствие рабочим программам дисциплин;
- разделение содержания карт по предметам и этапам обучения;
- акцентирование внимания на наглядном материале изучаемой темы с помощью картографических приемов;
- связь настольных и настенных карт по содержанию, обязательное согласование отображенного содержания с материалами в учебнике и в атласах по отдельным дисциплинам.

В связи с приходом современных методов в обучении и в картографии появились разновидности учебных картографических продуктов: это мультимедийные, анимационные карты и атласы, а также многофункциональные учебные карты. Используемые в учебных картах картографические приемы приведены в табл. 1.

**Таблица 1** ➔

Картографические приемы, используемые в учебных картах

**Table 1**

Cartographic techniques of educational maps

Картографические приемы	Применение
Способ значков	Отображение полезных ископаемых, достопримечательностей картографируемой территории
Способ значкового ареала (художественные значки разрабатываются так, чтобы возникали ассоциации с отображаемыми явлениями)	Отображение животных на зоогеографических картах
Способ знаков движения	Отображение движения различных экспедиций, фронтов, военных сражений
Способ изолиний	Отображение температуры воздуха
Способ линейных знаков	Отображение границ, рек, путей сообщения
Процедура генерализации	Отбор и обобщение содержания карты
Различные графические приемы	Получение общего визуального представления о картографируемом объекте
Различные шкалы	Отображение количественных показателей
Использование более яркого цвета для отображения темы	Привлечение внимания к теме карты

### 3.2 Познавательные картографические продукты

Познавательный вид деятельности осуществляется с помощью познавательных картографических продуктов (ПКП). Познавательные карты и модели формируют познавательную модель территории, основная их часть предназначена для обучения и познания действительности. Они дают возможность получения новых знаний об уникальности, самобытности и идентичности определенной территории, развивают кругозор, а также формируют у пользователя любознательность и произвольное желание к самообразованию.

Перечислим особенности ПКП:

- использование в качестве элементов тематического содержания уникальных объектов или событий, отличающих данный регион от другого, не связанных по теме и содержанию (в классической картографии при создании карт опираются на рациональное познание, карты создаются по общепринятым классификациям объектов или явлений, опираются на научную составляющую; в данном случае упор делается на отображение каких-то феноменальных объектов или явлений, причем возможна комбинация с несочетаемыми с точки зрения классической картографии объектами, например с кухней народов отображаемой территории);
- простота (иногда — перенесение на само картографическое изображение) легенд, имеющих один-два тематических элемента содержания, выполнение условных знаков по интуитивно понятному принципу (карты, созданные, например, для детей, будут сложны для чтения в случае с подробной легендой, поэтому принимается решение о минимизации легенды и приходится проектировать условные знаки так, чтобы они были интуитивно понятны пользователю);
- принадлежность к аналитическому типу (отвечают на один вопрос и включение познавательных моментов из различных сфер жизнедеятельности человека (это относится скорее к познавательным геопространственным моделям, в которых отображен результат геоинформационного анализа или представлена визуализация больших данных);
- использование мелкого масштаба, обусловленное обзорным характером ПКП (акцент делается на общее представление о картографируемом регионе, поэтому необходимо отобразить его полностью, а это чаще всего возможно только в мелком масштабе);
- достижение эффекта познавательности за счет дополнительных средств оформления (инфографики), способов картографического отображения, художественно-композиционных приемов (назначение и характер использования картографического произведения определяют наибольшие различия в применении изобразительных средств, приемах композиции для создания определенного стиля оформления [7]).

Картографические приемы, используемые в ПКП, приведены в табл. 2.

**Таблица 2** ➤

Картографические приемы, используемые в познавательных картографических продуктах

**Table 2**

Cartographic techniques of cognitive cartographic products

Картографические приемы	Применение
Способ художественных значков	Отображение уникальных объектов и достопримечательностей картографируемой территории
Способ картодиаграмм	Отображение количественных показателей
Количественные показатели	Отображение количественных характеристик объектов
Различные графические приемы	Получение общего визуального представления о картографируемом объекте
Различные шкалы	Отображение количественных характеристик
Интуитивно понятные условные знаки, минимизация легенды	Достижение легкости и простоты чтения содержания карты
Использование мелкого масштаба	Общий обзор территории картографирования
Применение инфографики	Достижение эффекта познавательности

### 3.3 Патриотические карты

Патриотический вид деятельности выполняется с помощью карт патриотической направленности, например карт геральдики, выдающихся людей, памятников и мемориалов, патриотических организаций. Такие карты служат основой для решения основных задач внутренней политики российского государства, а именно сохранения культурно-исторического наследия

и традиционной системы ценностей, основой которой служит патриотизм. Карты патриотической направленности применяются в качестве как основных, так и вспомогательных учебно-наглядных пособий для более глубокого изучения вопросов истории основания и развития региона или страны в целом, служат наглядным пособием при проведении патриотических бесед в средних общеобразовательных учреждениях.

Особенностями патриотических карт являются:

- направленность содержания на отображение элементов, формирующих патриотическое воспитание и любовь к Родине;
- включение в тематическое содержание элементов-символов государственности (флаг, герб и т. д.) или объектов, увековечивающих память героев различных войн, и т. д.;
- формирование осознанной выработки собственной позиции по отношению к современным общественно-политическим процессам на основе знания и осмысления истории, духовных ценностей и достижений страны.

Используемые в патриотических картах картографические приемы приведены в табл. 3.

**Таблица 3** ▶

Картографические приемы, используемые в разных типах патриотических карт

**Table 3**

Cartographic techniques of different types of patriotic maps

Тип патриотических карт	Картографические приемы	Применение
Карты геральдики	Наглядные условные знаки	Отображение символики районов, областей, государства (флаги, гербы и пр.)
Карты выдающихся людей	Символические условные знаки, фотографии выдающихся людей	Отображение мест рождения выдающихся людей: артистов, спортсменов, художников и т. д. Возможно сочетание фотографий и условных знаков, обозначающих профессию выдающихся людей
Карты памятников и мемориалов	Символические и наглядные условные знаки	Отображение местоположения памятников и мемориалов
Карты патриотических организаций	Символические и наглядные условные знаки	Отображение местоположения патриотических организаций

**Примечание.** Общим для всех типов патриотических карт картографическим приемом является процедура генерализации, применяемая в целях создания общегеографической основы.

### 3.4 Карты познавательного туризма

Карты познавательного туризма способствуют реализации туристского вида деятельности. Культурно-познавательный туризм — это вид отдыха, позволяющий сменить обстановку, освободиться от повседневной рутины, получить эстетическое наслаждение и обогатить себя новыми знаниями в области истории и культуры как своей страны, так и других стран [8]. Основной целью познавательного туризма является получение новых знаний о культурных и исторических местах той или иной территории, а целью карт познавательного туризма — передача знаний о культурно-исторических объектах территории.

Особенностями карт познавательного туризма являются:

- отсутствие прямой связи содержания карт с туристской деятельностью (на таких картах отображаются туристские маршруты с объектами, которые выполняют узкоотраслевые функции, например церкви и соборы используются паломниками как культовые сооружения для богослужения и посещаются преимущественно с целью паломничества или с культурно-познавательными целями [9]);
- разнообразное тематическое содержание (к часто встречаемым тематическим элементам можно отнести памятники археологии; культовую и гражданскую архитектуру; памятники ландшафтной архитектуры;

малые и большие исторические города; сельские поселения; музеи, театры, выставочные залы и др.; социокультурную инфраструктуру; объекты этнографии, народные промыслы и ремесла, центры прикладного искусства; технические комплексы и сооружения [10]);

- дополнение описанием объектов (достопримечательностей), фото- и видеоматериалами, аудиогидами, маршрутами, панорамными видами, видами с высоты птичьего полета.

Используемые в картах познавательного туризма картографические приемы приведены в табл. 4.

**Таблица 4** ➤

Картографические приемы, используемые в картах познавательного туризма

**Table 4**

Cartographic techniques of educational tourism

Картографические приемы	Применение
Способ значков (геометрических, буквенных, символических)	Демонстрация исторических, архитектурных, археологических достопримечательностей, а также мест и объектов, которые заслуживают внимания туристов и экскурсантов
Способ линейных знаков	Обозначение водных, велосипедных, пешеходных и прочих маршрутов
Способ ареалов	Обозначение мест разрешенной охоты, обитания животных, сбора грибов и ягод, границы парков и заповедников
Способ картограмм	Отображение количества мест в гостиницах и отелях на 100 туристов
Процедура генерализации	Отображение общегеографической основы
Различные графические приемы	Получение визуального представления об объектах картографирования

### 3.5 Пропагандистские карты

При пропагандистском виде деятельности широко используются пропагандистские карты. Термин *пропаганда* употребляется в нескольких значениях: 1) «система деятельности, направленная на распространение знаний, художественных ценностей и другой информации с целью формирования определенных взглядов, представлений, эмоциональных состояний, оказания влияния на социальное поведение людей»; 2) «распространение в массах идеологии политики определенных классов, партий, государств»; 3) «средство манипуляции массовым сознанием»<sup>4</sup>. В данной статье под пропагандой понимаются намеренные и систематические попытки формировать точки зрения, манипулировать сведениями и управлять поведением людей с целью получения желательной для пропагандистов реакции.

Пропагандистские карты помогают распространять политические или мировоззренческие идеологии, оправдывают войны; иногда страны-агрессоры визуально отображают угрозу самим себе, конструируя с помощью карт для народа образ врага; пропагандистские карты служат для того, чтобы узаконить самые большие преступления. Такие карты пытаются своим содержанием или своим построением и оформлением повлиять на формирование мнения пользователя карты или вызвать у него желаемую эмоциональную реакцию. Еще одно назначение пропагандистских карт — это объяснять будущие или уже произошедшие политические действия.

Таким образом, пропагандистские (политические, геополитические, агитационные, карты для воздействия на сознание населения) карты и картографические изображения своим построением и специальным содержанием вызывают эмоциональный эффект у пользователя [11].

<sup>4</sup> Социологический энциклопедический словарь. На русском, английском, немецком, французском и чешском языках / ред. Г.В. Осипов. М.: ИНФРА-М, 1998. С. 271.

К особенностям пропагандистских карт относятся:

- зависимость содержания пропагандистских карт от страны, где они были составлены, от господствующих идеологических взглядов, текущего временного момента или происходящего политического события, от социального заказа;
- использование фиктивных (заведомо ложных) данных;
- применение в оформлении ярких цветов, символов разных государств;
- ориентация на определенную группу населения с низким уровнем образования.

Применение карт для политической инструментализации и идеологической индоктринации уходит корнями далеко в прошлое, к самым истокам картографии, но в XX веке достигло своего апогея и продолжается до сих пор. Н. Шобесбергер (N. Schobesberger) разделяет все пропагандистские карты в зависимости от их функции как носителя информации в пропагандистском послании на две большие группы: карты, служащие фоном для пропаганды, и карты, осуществляющие пропаганду<sup>5</sup>. Первые в своем содержании и оформлении не передают никаких суггестивных сообщений, всегда находятся в рамках какого-либо текстуально выраженного послания или иллюстративных элементов оформления. Такие карты, выполняя функцию иллюстрации, часто встречаются на политических плакатах, служат для определения местоположения того пропагандистского послания, которое передает плакат. Сама же пропаганда осуществляется с помощью текстовой и иной иллюстрационной составляющей. Карты, осуществляющие пропаганду, сами являются носителями послания пропаганды, эти послания осуществляются через картографические приемы. Данная группа карт подразделяется на две подгруппы:

1. Карты, осуществляющие пропаганду через картографическое оформление и выразительные картографические средства. Это влияет на восприятие и внушает человеку искаженный взгляд на пространственные явления. В качестве примера графического оформления можно привести выбор определенной проекции (с помощью целенаправленного применения картографических проекций выделяют картографируемые регионы, представляют их большими или совсем маленькими), специальный подбор цветов и различных подписей. К выразительным картографическим средствам, используемым в таких картах, относятся суггестивное применение картографических переменных величин (окрашивание, форма), целенаправленное пространственное внушение через проекции и др.
2. Карты, осуществляющие пропаганду через содержание, представленное в карте, и тему карты вообще. Для этого используются генерализация отображаемых явлений, фальсификация данных с целью создания ложного представления, пропагандистские клише в легенде («враждебные страны»), сфальсифицированные неправильные изображения, а также фальсификация, возникающая в результате передачи статистических показателей, отображение различных сценариев (возможная пространственная ситуация в будущем в результате политических или военных действий, различных прогнозов), карикатурные анаморфозы (вымышленные или фантастические карты).

В картографии передача данных, информации и знаний происходит через графические средства и знаки. Необходимо сразу отметить, что такие графические средства, как цвет и идеологические цветовые ассоциации (самая популярная пара — красный и синий цвета), а также пояснительные подписи применяются на всех пропагандистских картах.

Картографические приемы, которые используются в картах, осуществляющих пропаганду, приведены в табл. 5.

<sup>5</sup> Schobesberger N. Propagandakartographie. Die Verwendung von Karten als Mittel für Werbung und politische Meinungsbildung. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://theses.univie.ac.at/detail/9025> (дата обращения: 13.02.2025).

Таблица 5

Картографические приемы, используемые в пропагандистских картах

Table 5

Cartographic techniques of propaganda maps

Тип пропагандистских карт		Картографические приемы	Применение
Карты, осуществляющие пропаганду через оформление		Применение наглядных, символических условных знаков, геометрических форм (кругов и стрел), а также жанровых картинок (символов) для идентификации стран и государств и фотографий правителей стран-агрессоров, использование агрессивных условных знаков	Актуализация ассоциаций с конкретными явлениями или объектами. Например, круги подходят для визуализации опасностей, исходящих из какого-нибудь центра; стрелы указывают направление явления, служат для визуализации динамики явлений (применяются пустые стрелы с возможным вписыванием объяснений и вставкой других знаков)
		Использование определенных цветов	Отображение идеологической составляющей (например, красный – цвет коммунизма, революции) и чувственной ассоциации (красный – это также огонь, кровь, угроза)
		Выбор оптимальных проекций, не искажающих формы площадей	Для выделения определенных государств или их частей
Карты, осуществляющие пропаганду через содержание	Карты фальсификаций	Целенаправленное неправильное изображение путем приписывания признаков или указания принадлежности объекта	Отображение нечеткой линии границ территории, неправильное обозначение русел рек и других географических реалий
	Карты с отображением статистических данных	Способ картограммы с применением разной категоризации	Создание совершенно разных интерпретаций одного и того же объекта
		Статистическая фальсификация (утаивание необходимых для интерпретации данных карты)	Отображение явления с необоснованным подразделением в легенде на «низкое», «среднее» и «высокое»
	Карты сценариев	Способ линейных знаков для отображения фиктивных, не существующих в пространстве положения фронтов, соотношения сил и сфер влияния, а также символов стран-агрессоров (по мнению тех стран, которым угрожают)	Отображение возможного состояния территории в будущем
	Карты фантазий	Использование картографических элементов и различных графических приемов для создания какой-либо новой картины мира	Создание вымышленного изображения через новое расположение элементов карты и их оформление
	Картографические анаморфозы	Применение различного масштаба в пределах карты в зависимости от отображаемой тематики. Использование карикатур	Отображение на тематических картах размеров стран или континентальных массивов, отражающее не их реальный геометрический размер, а в пропорции к какому-либо свойству

### 3.6 Картографические игры

Игра имеет совсем другой признак по отношению к различным видам деятельности и характеризует способ действия. В рамках картографии игровые формы можно внедрять в обучение наукам о Земле, использовать картографический подход в играх, направленных на познание окружающей действительности. При этом картографические игры – это особый продукт картографии и геоинформатики, а карта для проведения игры – это особый вид тематической карты.

Картографические игры могут быть обучающими и познавательными. Обучающие картографические игры создаются в соответствии с рабочей программой дисциплины. Их содержание связано, как правило, или с одним разделом, или со всей программой дисциплины.

К особенностям познавательных картографических игр можно отнести:

- упрощенную картографическую основу;
- яркое представление познавательной информации и знаний по передаваемой теме;
- обязательное присутствие элементов игры (например, отображение маршрута, по которому передвигается игрок).

Особенностью содержания обучающих картографических игр является соответствие разделам рабочей программы преподаваемой дисциплины.

Используемые в картографических играх приемы приведены в табл. 6.

**Таблица 6**   
Картографические приемы, используемые в картографических играх

**Table 6**  
Cartographic techniques of map games

Картографические приемы	Применение
Способ художественных знаков	Отображение достопримечательностей картографируемой территории
Способ линейных знаков	Отображение маршрутов
Различные графические приемы (использование рисунков и фотографий)	Отображение сцены игры
Процедура генерализации	Отбор и обобщение общегеографических элементов в том случае, когда карта создается конкретно для проведения игры

## 4 Выводы

Функции социального картографирования реализуются через учебно-образовательный, познавательный, патриотический, туристский, пропагандистский и игровой виды деятельности. При реализации этих видов деятельности используются соответствующие карты. Карты передают социальные геознания с помощью различных картографических приемов, таких как:

- 1) синтаксический — акцентирование внимания на главном содержании с помощью яркого цвета, стрелок, текста, т. е. отображение иерархии знаков и их взаимосвязи для формирования картографических образов;
- 2) математический — применение картографических проекций;
- 3) тематический — формулирование и оформление названия карты;
- 4) семантически-когнитивный — генерализация объектов и явлений, т. е. отбор знаний об объектах и явлениях;
- 5) семантико-оформительский — использование интуитивно понятных условных знаков;
- 6) оформительский — приемы «оживления карты», использование различных видов инфографики;
- 7) познавательный — создание серии разновременных карт для познания динамики явлений.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Карпик А.П., Лисицкий Д.В. Исследование мировых трендов и обоснование направлений развития сферы геодезии и картографии РФ до 2030 года // Геопрофи. 2021. № 1. С. 4–11.
2. Стрельникова А.В. Социальное картографирование: эволюция метода // Вестник РГГУ. Серия: Философия. Социология. Искусствоведение. 2013. № 2. С. 210–217.
3. Шульгина О.В., Шульгина Д.П., Михайленко Н.Л. Роль картографической культуры в развитии познавательной, научной, коммуникативной и творческой деятельности человека // Человек и культура. 2022. № 6. С. 111–127. DOI:10.25136/2409-8744.2022.6.38505.
4. Вафина З.А. Социальное картографирование как инструмент решения социальных проблем города // Стратегия устойчивого развития регионов России. 2012. № 11. С. 153–157.

5. Safiullin M.R., Ermolaeva P.O., Yermolaev O.P., et al. Current Perspectives on Social Mapping of Urban Territories // Asian Social Science. 2015. Vol. 11. No. 6. P. 207–213. DOI:10.5539/ass.v11n6p207.
6. Чибряков Я.Ю. О термине «картографирование» // Геодезия и картография. 2019. № 8. С. 59–63. DOI:10.22389/0016-7126-2019-950-8-59-63.
7. Радченко Л.К. Познавательный аспект в картографии // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 4. С. 138–145. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-4-138-145.
8. Крестьянинова О.В. Культурно-познавательный туризм: его виды и специфика // Научное обозрение. Педагогические науки. 2024. № 1. С. 10–14. DOI:10.17513/srps.2519.
9. Гладкий А.В., Скляров А.А. Современные картографические модели и особенности их использования в туризме // Псковский регионологический журнал. 2017. № 1(29). С. 61–75.
10. Примаченко Е.И., Фадейкина А.В. Разработка карт познавательного туризма для маршрута «Четыре скандинавские столицы» // Огарёв-Online. 2019. Т. 7. № 15. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ogarev-online.ru/2311-2468/article/view/279151/257558> (дата обращения: 06.03.2025).
11. Moser J. Propagandakarten in der “Kolonialen Bildsammlung” der Stadt- und Universitätsbibliothek Frankfurt am Main // 15 Jahre “Koloniales Bildarchiv” an der Stadt- und Universitätsbibliothek Frankfurt am Main; Dresdener kartographische Schriften. Dresden: Universitätsbibliothek Johann Christian Senckenberg, 2004. S. 43–54.

**АВТОР Радченко Людмила Константиновна**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск, Россия  
кафедра картографии и геоинформатики, Институт геодезии и менеджмента  
канд. техн. наук, доцент  
 0009-0009-0448-8094

Поступила 21.03.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Cartographic techniques for implementing functions social mapping

**Lyudmila K. Radchenko**<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 l.k.radchenko@sgugit.ru

**CITATION** Radchenko LK. Cartographic techniques for implementing functions social mapping. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 109–121. DOI:10.30533/GiA-2025-034.

**KEYWORDS** social mapping, social mapping functions, social geoknowledge, educational maps, cognitive cartographic products, patriotic maps, propaganda maps, tourist maps, cartographic games

**ABSTRACT** The article presents material on the emerging interest in the issues of social mapping. A number of definitions of “social mapping” are listed in order to clarify this concept as a section of thematic mapping in terms of displaying social objects, processes and phenomena. The types of social activity are identified from the point of view of transferring social geo-knowledge using geographic maps. The functions of social mapping through educational, cognitive, tourist, patriotic, propaganda and game activities are defined. It is proposed to implement the educational type of activity with the help of educational maps, the cognitive type of activity with the help of cognitive cartographic products, the patriotic type of activity with the help of patriotic maps, the tourist type of activity with the help of cognitive tourism maps, the propaganda type of activity with the help of propaganda maps, and the game type of activity with the help of game cartographic products. The concept of “cartographic techniques” is defined as a set of used methods of cartographic representation of objects and phenomena, various scales, all kinds of infographics, various graphic techniques, choice of cartographic projection and generalization procedure. For each type of cartographic product, the applied cartographic techniques are identified and designated. The identified and substantiated cartographic techniques will be further applied to the formation of scientific and methodological foundations for social mapping and will also be used to develop and create new types and kinds of socially oriented maps.

**REFERENCES**

1. Karpik AP, Lisitsky DV. Issledovanie mirovyyh trendov i obosnovanie napravlenij razvitiya sfery geodezii i kartografii RF do 2030 goda [Study of global trends and substantiation of development directions in the sphere of geodesy and cartography of the Russian Federation until 2030]. *Geoprofi.* 2021;1: 4–11. (In Russian).

2. Strelnikova AV. Social'noe kartografirovanie: jevoljucija metoda [Social mapping: evolution of the method]. *Bulletin of the Russian State University for the Humanities. Series: Philosophy. Sociology. Art Criticism*. 2013;2: 210–217. (In Russian).
3. Shul'gina OV, Shul'gina DP, Mihajlenko NL. Rol' kartograficheskoj kul'tury v razvittii poznavatel'noj, nauchnoj, kommunikativnoj i tvorcheskoj dejatel'nosti cheloveka [The role of cartographic culture in the development of cognitive, scientific, communicative and creative human activity]. *Man and Culture*. 2022;6: 111–127. (In Russian). DOI:10.25136/2409-8744.2022.6.38505.
4. Vafina ZA. Social'noe kartografirovanie kak instrument reshenija social'nyh problem goroda [Social mapping as a tool for solving social problems of the city]. *Strategy for sustainable development of Russian regions*. 2012;11: 153–157. (In Russian).
5. Safiullin MR, Ermolaeva PO, Yermolaev OP, et al. Current Perspectives on Social Mapping of Urban Territories. *Asian Social Science*. 2015;11(6): 207–213. DOI:10.5539/ass.v11n6p207.
6. Chibryakov YaYu. O termine “kartografirovanie” [On the term “mapping”]. *Geodesy and Cartography*. 2019;8: 59–63. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-950-8-59-63.
7. Radchenko LK. Poznavatel'nyj aspekt v kartografii [Cognitive aspect in cartography]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(4): 138–145. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-4-138-145.
8. Krestyaninova OV. Kul'turno-poznavatel'nyj turizm: ego vidy i specifika [Cultural and educational tourism: its types and specifics]. *Scientific review. Pedagogical sciences*. 2024;1: 10–14. (In Russian). DOI:10.17513/srps.2519.
9. Gladkiy AV, Sklyarov AA. Sovremennye kartograficheskie modeli i osobennosti ih ispol'zovaniya v turizme [Modern cartographic models and features of their use in tourism]. *Pskov Journal of Regional Studies*. 2017;1(29): 61–75.
10. Primachenko EI, Fadeikina AV. Razrabotka kart poznavatel'nogo turizma dlja marshruta “Chetyre skandinavskie stolicy” [Development of educational tourism maps for the route “Four Scandinavian capitals”]. *Ogarev-Online*. 2019;7(15). (In Russian). Available from: <https://ogarev-online.ru/2311-2468/article/view/279151/257558> (Accessed 6 March 2025).
11. Moser J. Propagandakarten in der “Kolonialen Bildsammlung” der Stadt- und Universitätsbibliothek Frankfurt am Main [Propaganda maps in the “Colonial Picture Collection” of the City and University Library Frankfurt am Main]. *15 Years of “Koloniales Bildarchiv” at the City and University Library Frankfurt am Main; Dresdener kartographische Schriften*. Dresden: Universitätsbibliothek Johann Christian Senckenberg; 2004: 43–54. (In German).

**AUTHOR Lyudmila K. Radchenko**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 Department of Cartography and Geoinformatics, Institute of Geodesy and Management  
 PhD in Engineering, Associate Professor

 0009-0009-0448-8094

Submitted: March 21, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Автоматизация расчетов интегральной оценки рационального использования земель сельскохозяйственного назначения (на примере Новгородской области)

Д.В. Баранова<sup>1</sup>✉, А.О. Белоусов<sup>1</sup>, В.А. Павлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,  
Санкт-Петербург, Россия  
✉ evbaranova2010@yandex.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Баранова Д.В., Белоусов А.О., Павлова В.А. Автоматизация расчетов интегральной оценки рационального использования земель сельскохозяйственного назначения (на примере Новгородской области) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 122–135. DOI:10.30533/GiA-2025-031.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** земли сельскохозяйственного назначения, рациональное использование земель, интегральная оценка, геоинформационная система, показатели качества, технико-экономические показатели хозяйственной деятельности

**АННОТАЦИЯ** Статья посвящена проблеме рационального использования земель сельскохозяйственного назначения, достаточно актуальной в настоящее время в связи со сложившейся негативной тенденцией по выбытию таких земель из хозяйственного оборота и развитием на них процессов деградации. Для решения данной проблемы авторами разработаны технические решения по автоматизации алгоритма оценки рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в геоинформационной системе QGIS. В основу алгоритма заложена разработка системы показателей рационального использования земель, которая учитывает качественные характеристики земель сельскохозяйственного назначения и технико-экономические показатели ведения хозяйственной деятельности на таких землях. С использованием языка программирования Python обработаны показатели, объединены в единую шкалу оценки, а также вычислены интегральные оценки через кластеризацию и применение формул на языке Python. На основе расчетов интегральных оценок выполнено зонирование территории на депрессивные, стабильные и прогрессивные группы с разработкой для каждой группы определенного перечня мероприятий, направленных на рациональное использование земель сельскохозяйственного назначения. Апробация разработанного алгоритма осуществлена на территории Новгородской области, в которой по результатам исследования выделены рационально и нерационально использующие свои земли хозяйствующие субъекты.

## 1 Введение

Рациональное и эффективное использование сельскохозяйственных угодий стало одной из критических современных проблем, связанной с масштабным переходом России к рыночной экономике, который наблюдается с конца прошлого века. Новая экономическая реальность создала серьезные вызовы в области землепользования и защиты земельных ресурсов, особенно остро затронув аграрный сектор. В условиях поддержания государственного курса на импортозамещение именно земли сельскохозяйственного назначения (ЗСХН) становятся ключевым элементом обеспечения продовольственной независимости страны [1]. Более того, рациональное использование ЗСХН напрямую влияет на устойчивое развитие российских регионов. Таким образом, современные экономические реалии требуют особого внимания к вопросам организации и использования земель в аграрном секторе.

Статистические отчеты последних лет демонстрируют тревожную тенденцию: ЗСХН подвергаются значительной деградации и истощению. Отсутствие системного подхода к управлению ЗСХН привело к катастрофическому сокращению таких земель: более чем на 2 млн гектаров за пятилетний период. Сложившаяся ситуация требует незамедлительного вмешательства — принятия в сфере управления земельными ресурсами агропромышленного комплекса оперативных и грамотных решений, направленных на организацию рационального использования ЗСХН.

Эффективное управление земельными ресурсами предполагает внедрение современных подходов, в том числе основанных на применении геоинформационных технологий. В то же время процесс управления ЗСХН затрудняется отсутствием строго установленных показателей их рационального использования, которые позволили бы произвести комплексную оценку земельно-ресурсного потенциала. В сложившихся условиях именно специализированные геоинформационные платформы становятся незаменимым инструментом для принятия управленческих решений, позволяя проводить всесторонний анализ земельно-ресурсного потенциала регионов.

В настоящее время ученые, исследующие вопросы и проблемы в области земельных отношений, разрабатывают подходы и методы оптимизации землепользования, а также эффективные способы управления земельными ресурсами. Так, данной проблеме посвящены труды С.Н. Волкова, А.А. Варламова, Д.А. Шаповалова, П.В. Ключина, К.И. Черкашина [2], А.П. Сизова, М.В. Дмитриевой, А.Н. Бармина [3], Г.А. Ефимовой, В.А. Павловой, М.А. Сулина [4] и др.

Вопросы внедрения ГИС-технологий в сферу управления земельными ресурсами разрабатывают такие ученые, как А.В. Дубровский [5], А.П. Карпик, В.Б. Жарников [6], Е.Л. Уварова [7] и др. При этом применение ГИС для целей комплексной оценки рационального землепользования изучено недостаточно. Отсутствуют единые подходы к оценке рационального использования ЗСХН, отражающие в комплексе качественные, технологические, социально-экономические особенности использования таких земель в ГИС-среде.

Цель исследования заключается в разработке технических решений по автоматизации алгоритма оценки рационального использования ЗСХН.

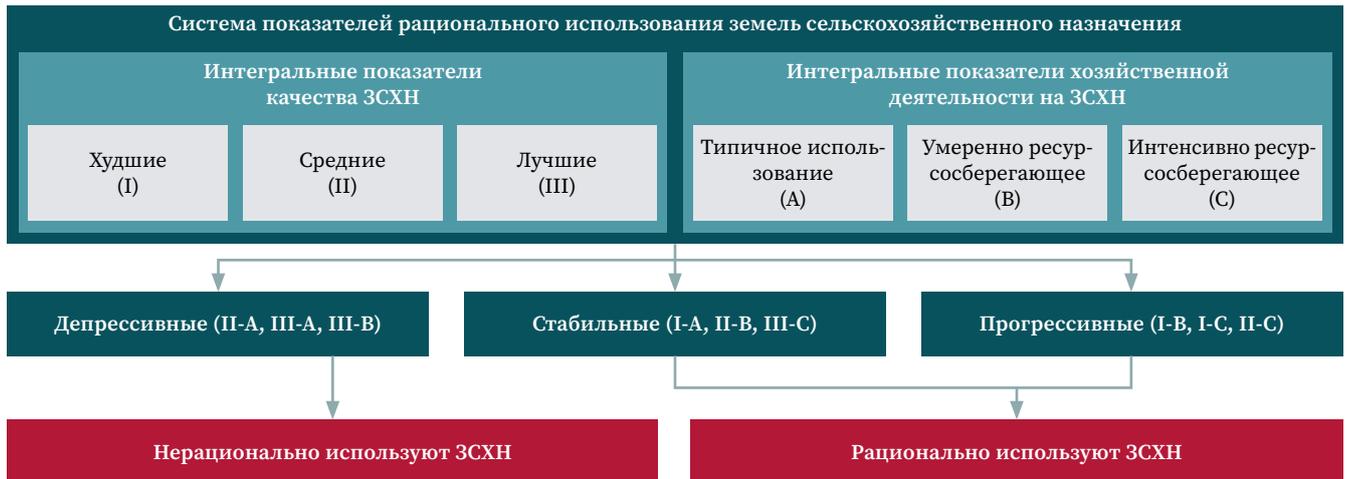
## 2 Материалы и методы

Основными методами в исследовании являются расчетно-конструктивный, графический, а также методы экономико-математического моделирования. В качестве информационной основы исследования выступили разнообразные источники: официальная статистическая отчетность о состоянии и использовании земель, картографические материалы (включая почвенные и тематические карты) и др. Компьютерная обработка полученных сведений осуществлялась с применением геоинформационной системы QGIS и Microsoft Excel.

### 3 Результаты и обсуждение

**Рис. 1**  Алгоритм выявления хозяйствующих субъектов, рационально и нерационально использующих ЗСХН

**Fig. 1** Algorithm for identifying economic entities using agricultural land rationally and irrationally



В настоящее время, несмотря на важность и необходимость устойчивого развития сельского хозяйства для обеспечения продовольственной безопасности государства, не закреплен перечень показателей, которые позволяли бы определять, рационально или нерационально используются ЗСХН. Такие вопросы разрабатываются только в исследованиях ведущих ученых в данной сфере деятельности. В ходе научных исследований [2–7] традиционные школы по землеустройству разрабатывают комплексные показатели рационального использования ЗСХН, что позволяет всесторонне оценивать использование этих территорий.

При этом, на наш взгляд, в основу должна быть заложена интегральная оценка, основанная на многокритериальном подходе. Она поможет не только разделить территорию на зоны в зависимости от использования ЗСХН, но и выделить субъекты, схожие в этом плане. Проведение такой оценки на уровне муниципальных образований сделает возможным более качественное планирование использования земель, а внедрение таких мер на уровне конкретных сельскохозяйственных организаций усилит контроль над управлением ЗСХН.

Анализируя разработки выдающихся научных школ, можно сделать вывод о влиянии на рациональное использование ЗСХН различных факторов: от общепризнанных до специальных, предлагаемых учеными. При этом показатели качества ЗСХН играют ключевую роль.

При определении направления сельскохозяйственной деятельности важное значение имеет оценка качественных (природных) свойств ЗСХН. Эти естественные показатели, не изменяемые человеческой деятельностью, существенно определяют эффективность аграрного производства. Именно учет и оценка качественных показателей становятся фундаментом для выбора оптимальной специализации в агропромышленном секторе.

Современные исследования направлены на разработку многофакторной системы показателей, позволяющей проводить детальный анализ качественных характеристик ЗСХН, при этом признанным стандартом в этой области

**Рис. 2** 

Система показателей рационального использования ЗСХН

**Fig. 2**

System of indicators for rational use of agricultural land

Показатели качества
Тип почв (31,18)
Балл бонитета (27,69)
Гранулометрический состав (15,56)
Кислотность (10,98)
Содержание гумуса (4,67)
Степень переувлажнения и подтопления (6,52)
Степень эродированности (3,41)

Технологические показатели
Рельеф (10,65)
Конфигурация (компактность) (11,38)
Контурность (11,27)
Наличие подъездных путей (9,51)
Освоенность территории / землепользования (8,50)
Распаханность территории / землепользования (6,48)
Каменистость (6,04)
Закустаренность (4,64)
Доля мелиорированной пашни (5,11)
Площадь пашни, пригодной для ввода в сельскохозяйственный оборот (3,29)

Социально-экономические показатели
Обеспеченность трудовыми ресурсами (4,11)
Уровень доходности (3,05)
Инвестиции в сельское хозяйство на 100 га (3,26)
Транспортная обеспеченность (2,14)
Удаленность от рынков сбыта (1,8)
Стоимость основных фондов (1,67)
Доходность от агротуризма (2,38)
Кадастровая стоимость (удельный показатель кадастровой стоимости) (1,44)
Доля арендованных земель (1,43)
Доля используемых сельскохозяйственных угодий (1,46)

выступает методика оценки качества, разработанная ФГУП «Госземкадастрсъемка» — ВИСХАГИ. В основу методики заложен расчет интегрального показателя качества пахотнопригодных земель (зернового эквивалента).

Однако, на наш взгляд, она содержит ряд недостатков, одним из которых является ее сложность, в то же время методика не соответствует основной цели — разделению земель по их природным характеристикам, производительности и эффективности. Методика не обеспечивает возможности сравнивать земельные категории на уровне агроклиматических зон, регионов и всей страны. Основные элементы классификации (участки земли, виды почв) оцениваются на основе условных показателей, которые базируются на нереалистичных стандартах и субъективно составленных оценках урожайности и зернового эквивалента. С целью совершенствования оценки качественных характеристик земель Почвенным институтом им. В.В. Докучаева разработан национальный стандарт «Показатели качества почв», утвержденный в 2022 году<sup>1</sup>.

Основываясь на результатах научных исследований [2, 3, 5, 6, 8–10], на анализе методики оценки качества ВИСХАГИ, а также разработанного национального стандарта «Показатели качества почв», мы составили перечень показателей качества ЗСХН. Важно отметить, что, кроме качества ЗСХН, на рациональное использование таких земель также влияют технологические и социально-экономические аспекты, которые объединены в группу факторов технико-экономических показателей хозяйственной деятельности на ЗСХН и включают себя две группы показателей. Социально-экономические показатели отражают экономическое положение районов и сельскохозяйственных организаций, технологические — характеризуют методы обработки почвы и подходы к выращиванию культур. Нами разработан комплекс показателей, который, на наш взгляд, всесторонне отражает рациональное использование сельскохозяйственных земель и обеспечивает возможность их всеобъемлющей оценки.

Результативность сельскохозяйственного труда существенно отличается от других сфер производства своей зависимостью от природных факторов. Плодородие почв и погодные условия могут кардинально влиять на объем получаемой продукции даже при идентичных трудозатратах. Максимальный учет особенностей природной среды становится, таким образом, ключевым условием для эффективного повышения производительности в аграрном секторе.

Совместный анализ разработанных групп показателей дает возможность оценить, насколько рационально используются ЗСХН. Разработанная система показателей представлена на рис. 2. Она дополняет существующие научные разработки, которые оценивают рациональное использование земель, опираясь либо на качественные, либо на экономические показатели. Нами же предложена система показателей, позволяющая комплексно оценить рациональное использование ЗСХН, учитывая качественные, технические и социально-экономические характеристики. Их приоритетность установлена методом анализа иерархий, основанным на попарном сравнении экспертных оценок [1].

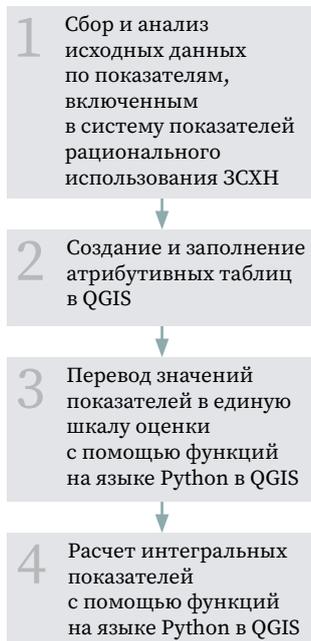
Для автоматизации вычисления интегральных показателей была выбрана геоинформационная система QGIS. Эта ГИС-среда имеет множество достоинств, включая мультиплатформенность, доступность и совместимость с различными языками программирования<sup>2</sup>.

1 ГОСТ Р 70229-2022. Почвы. Показатели качества почв. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 26 с.

2 Carosio A. Geoinformationssysteme. Band 1 / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, 2006. 153 S.

**Рис. 3**   
Этапы определения интегральных показателей

**Fig. 3**  
The stages of determining integral indicators



В то же время QGIS особенно привлекательна благодаря обширной коллекции как встроенных, так и дополнительных модулей, обеспечивающих широкие возможности для анализа информации, работы с геометрическими данными и управления базами данных, а также выполнения других операций. Процесс расчета состоял из нескольких последовательных этапов (рис. 3).

В качестве объекта апробации выбран регион на северо-западе России — Новгородская область. Информация об инфраструктуре и административных границах этого субъекта РФ была получена на первом этапе посредством веб-сервиса NextGIS Data<sup>3</sup>. Технологические характеристики участков, такие как конфигурация и контурность, определялись путем анализа сборных планов хозяйств, для которых выполнялась пространственная привязка. Аналогичная геопривязка проводилась и для почвенных карт, что позволило установить качественные параметры сельхозугодий.

Второй этап заключается в формировании семантической части. На данном этапе вся собранная информация была структурирована в виде векторных слоев формата .shp. Исходя из разработанной системы показателей рационального использования ЗСХН, мы создали определенный перечень полей, которые включены в базовые векторные слои с одноименным названием. В результате заполнения атрибутивных таблиц формируется определенная база данных по каждому хозяйствующему субъекту, однако с целью сопоставления значений и сведения их воедино необходимо осуществить кластеризацию полученных значений.

На третьем этапе после анализа числовых данных по Новгородской области была проведена их группировка на три кластера. Выбор оптимального количества кластеров требует сочетания практических навыков и теоретических знаний. При резком увеличении дистанционных показателей между кластерами стоит остановить процесс группировки элементов. Необходимо также учитывать основную задачу исследования, чтобы каждая сформированная группа сохраняла достаточный объем для последующей аналитической работы.

Геоинформационная система QGIS содержит определенный набор методов кластеризации, выбор которых осуществляется на основе целей и задач исследования. Значениям показателей, которые попадают в определенный кластер, присваивается балл, затем осуществляется их сопоставление и непосредственно расчет интегральных показателей. Мы применили различные способы кластеризации атрибутивных показателей и определили, что наиболее эффективным является метод равных интервалов. Именно этот подход позволил оптимально распределить все полученные значения. Кластеризация методом равных интервалов осуществляется в автоматическом режиме. Благодаря встроенным модулям QGIS анализирует показатели из атрибутивных таблиц и формирует три группы с определенными пороговыми значениями для каждого параметра, где 3 — наивысший по значимости балл, 1 — наименьший.

Чтобы привести все показатели к единой системе измерения, мы создали специальные функции с использованием оператора CASE, так как механический перевод показателей в баллы является достаточно трудоемким, допускает наличие погрешностей и ошибок. В качестве примера можно привести алгоритм конвертации в балльную систему шестого по порядку показателя («Распаханность территории / землепользования») из перечня технологических показателей (рис. 4). Важно отметить, что нумерация показателей в разработанных функциях идентична их порядковым номерам в таблице атрибутов.

**Рис. 4**   
Перевод показателя «Распаханность территории / землепользования» в единую балльную систему оценки

**Fig. 4**  
Conversion of the indicator “Ploughing of the territory / land use” into a single scoring system

```

CASE
WHEN "6" <= 40.91 THEN 1
WHEN "6" <= 64.3 THEN 2
WHEN "6" > 64.3 THEN 3
END
    
```

3 NextGIS Data. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.nextgis.com> (дата обращения: 12.02.2025).

**Рис. 5** 

Функция на языке Python для расчета интегрального показателя качества ЗСХН

**Fig. 5**

A function in Python for calculating the integral quality index of agricultural lands

```

("Kjy1" * 31.18) +
("Kjy2" * 27.69) +
("Kjy3" * 15.56) +
("Kjy4" * 10.98) +
("Kjy5" * 4.67) +
("Kjy6" * 6.52) +
("Kjy7" * 3.41)
    
```

**Рис. 6** 

Функция на языке Python для расчета интегрального показателя хозяйственной деятельности на ЗСХН

**Fig. 6**

A function in Python for calculating the integral indicator of economic activity on agricultural lands

```

("Kij1" * 10.65) + ("Kij2" * 11.38) + ("Kij3" * 11.27) + ("Kij5" * 8.5) +
("Kij6" * 6.48) + ("Kij7" * 6.04) + ("Kij8" * 4.64) + ("Kij9" * 5.11) +
("Kij10" * 3.29) + ("Kij11" * 4.11) + ("Kij12" * 3.05) + ("Kij13" * 3.26) +
("Kij14" * 2.14) + ("Kij15" * 1.8) + ("Kij16" * 1.67) + ("Kij17" * 2.38) +
("Kij18" * 1.44) + ("Kij19" * 1.43) + ("Kij20" * 1.46)
    
```

С использованием языка Python были разработаны специальные функции для унификации различных показателей в единую балльную систему. Таким образом, рассчитываются интегральные показатели качества и хозяйственной деятельности на ЗСХН на основе данных о весе каждого показателя, рассчитанном методом анализа иерархий, и его относительном значении ( $K_{ij}$ ). Этот шаг, являющийся заключительным в процессе определения интегральных показателей, отражен на рис. 5 и 6.

Во вкладке Total атрибутивной таблицы представлены результаты вычислений. Демьянский район Новгородской области послужил примером для демонстрации расчета интегрального показателя качества ЗСХН (рис. 7).

Предложенный нами алгоритм в системе QGIS позволяет комплексно оценивать качество ЗСХН и хозяйственную деятельность, а разработанная программа существенно ускоряет процесс анализа ЗСХН благодаря автоматическому конвертированию вводимых данных в балльную систему. В то же время осуществляется автоматический расчет интегральных показателей, обеспечивая всесторонний анализ ЗСХН.

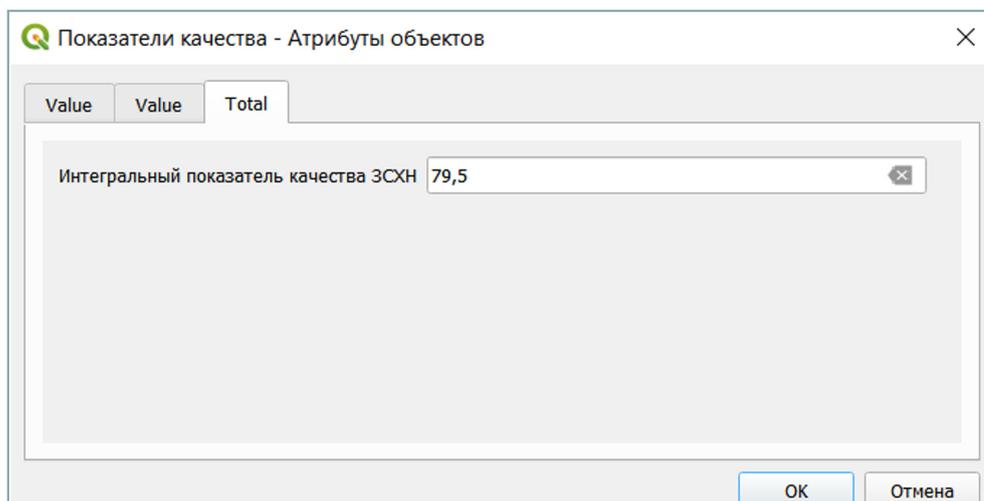
По результатам расчетов интегральных показателей качества ЗСХН предложена классификация на три группы (кластера): худшие (I), средние (II), лучшие (III) — основополагающий принцип зонирования территорий. Эта концепция берет начало в работах Д. Рикардо, выдающегося представителя политической экономии. В своих исследованиях британский ученый-экономист установил связь между качеством земельных ресурсов и формированием земельной ренты. Опираясь на экономические законы спроса-предложения и снижения плодородия, он доказал, что использование низкокачественных земель приводит к образованию ренты на участках среднего и высокого качества. В настоящее время при проведении оценочных работ относительно ЗСХН ключевое значение имеет разделение земельных участков по качеству на три категории (лучшего, среднего и худшего качества), что позволяет учитывать качественные характеристики ЗСХН [1].

**Рис. 7** 

Результат расчета интегрального показателя качества ЗСХН Демьянского района Новгородской области

**Fig. 7**

The result of the calculation of the integral indicator of the quality of agricultural lands of the Demyansky district, Novgorod region



Наилучшие качественные характеристики демонстрирует третий кластер, где наблюдается минимальное подтопление, слабая эрозия почв, низкий уровень кислотности и высокое плодородие. Что касается второго кластера, то, несмотря на дефицит гумуса и значительную эрозию, почвы здесь отличаются средними показателями качества при высокой плодородности. Самые неблагоприятные условия отмечены в первом кластере: почвенный покров характеризуется средней степенью эродированности, повышенной кислотностью, низким содержанием гумуса и слабым плодородием.

На основе оценки влияния хозяйственной деятельности на использование ЗСХН выделено три группы (кластера) их использования: типичное использование (А), умеренно ресурсосберегающее (В), интенсивно ресурсосберегающее (С). Такой подход обеспечивает всестороннюю оценку эффективности сельскохозяйственного производства на различных территориях. В его основу заложена концепция почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия ФАО (англ. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) [1].

При классификации на три группы учитываются экономические показатели (прибыльность предприятий, структура арендных отношений), человеческие ресурсы, а также физические характеристики угодий — их конфигурация, технологические свойства, размер и др.

Территории с индексом С — это регионы-лидеры, отличающиеся высокими зарплатами в сельском хозяйстве, инвестиционной привлекательностью и оптимальными условиями для аграрного производства. Их характеризует удобное расположение сельхозугодий, минимальная закустаренность и солидная экономическая база. Промежуточную позицию занимают районы категории В со средними показателями развития. Замыкают классификацию территории группы А, демонстрирующие базовый уровень использования ЗСХН и наиболее низкие социально-экономические индикаторы.

Сопоставление групп показателей качества и хозяйственной деятельности на ЗСХН дает возможность установить рационально или нерационально использующие свои земли хозяйствующие субъекты и на основании этих результатов разработать комплекс мероприятий для каждой группы районов. Депрессивные районы нерационально используют ЗСХН, в таких районах сформировалась негативная тенденция, связанная с отсутствием социально-экономических механизмов, способных вовлечь ЗСХН в хозяйственный оборот. При этом такие земли обладают лучшим качеством, следовательно, пригодны для использования в сельском хозяйстве. Прогрессивные и стабильные районы рационально используют ЗСХН.

Стоит заметить, что даже стабильные территории могут утратить свои позиции при ухудшении социально-экономических условий, переходя в разряд депрессивных. Депрессивные районы могут достичь уровня стабильных при условии грамотного анализа показателей и внедрения мероприятий, направленных на рациональное использование ЗСХН. Таким образом, есть возможность улучшить текущую ситуацию.

На основе материалов парламентских обсуждений «Землеустроительное обеспечение вовлечения в оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения»<sup>4</sup> мы классифицировали районы и сформировали комплекс рекомендаций, направленных на рациональное использование ЗСХН. Детальные меры представлены на рис. 8 [8–12].

Государственная поддержка является ключевым фактором для успешного воплощения инициатив в сфере земельных отношений. Эффективное управление земельными ресурсами требует целого ряда взаимосвязанных мер как на уровне отдельных сельскохозяйственных организаций, так и в масштабах муниципальных образований. Точечные изменения или единичные меры не способны кардинально улучшить положение дел в области землепользования — только системный подход может привести к желаемым результатам.

<sup>4</sup> Землеустроительное обеспечение вовлечения в оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения: сборник материалов. М.: Издание Совета Федерации, 2022. 226 с.

Депрессивные районы (II-A, III-A, III-B)	Стабильные районы (I-A, II-B, III-C)	Прогрессивные районы (I-B, I-C, II-C)
Вовлечение в хозяйственный оборот выбывших сельскохозяйственных угодий за счет привлечения инвестиций и субсидирования	Вовлечение в хозяйственный оборот выбывших сельскохозяйственных угодий за счет привлечения инвестиций и субсидирования	Вовлечение в хозяйственный оборот выбывших сельскохозяйственных угодий за счет средств сельскохозяйственной организации, проведения культуртехнических мероприятий
Повышение размера ставок земельного налога при неэффективном использовании ЗСХН и уменьшение ставок для производителей экологически чистой сельскохозяйственной продукции	Повышение размера ставок земельного налога при неэффективном использовании ЗСХН и уменьшение ставок для производителей экологически чистой сельскохозяйственной продукции	Повышение размера ставок земельного налога при неэффективном использовании ЗСХН и уменьшение ставок для производителей экологически чистой сельскохозяйственной продукции
Передача не востребуемых земель в аренду заинтересованным пользователям для сельскохозяйственного использования	Внесение сбалансированных минеральных удобрений с целью достижения стабильной и высокой урожайности	Реализация инвестиционных проектов в сфере агропромышленного комплекса
Реализация инвестиционных проектов в сфере агропромышленного комплекса	Реализация инвестиционных проектов в сфере агропромышленного комплекса	Развитие агротуризма с возможностью внедрения и участия в полном цикле производства
Восстановление обанкротившихся предприятий за счет инвестиций и субсидирования	Консервация участков на определенный срок с разработкой проектов землеустройства	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Внедрение скоринга в рамках земельного контроля	Развитие агротуризма с возможностью внедрения и участия в полном цикле производства	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Диверсификация специализации	Создание кластеров в рамках сельскохозяйственной кооперации и промышленной интеграции	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Консервация участков на определенный срок с разработкой проектов землеустройства	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Развитие агротуризма с возможностью внедрения и участия в полном цикле производства	Консолидация земельных долей	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Создание кластеров в рамках сельскохозяйственной кооперации и промышленной интеграции	Передача участков в собственность добросовестным арендаторам (при заключении аренды не менее чем на 10 лет)	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала	Мораторий на отчуждение земель в течение 10 лет с момента приобретения (обязательство по ведению сельскохозяйственного производства начиная с первого года приобретения)	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Консолидация земельных долей	Мораторий на отчуждение земель в течение 10 лет с момента приобретения (обязательство по ведению сельскохозяйственного производства начиная с первого года приобретения)	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Передача участков в собственность добросовестным арендаторам (при заключении аренды не менее чем на 10 лет)	Мораторий на отчуждение земель в течение 10 лет с момента приобретения (обязательство по ведению сельскохозяйственного производства начиная с первого года приобретения)	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала
Мораторий на отчуждение земель в течение 10 лет с момента приобретения (обязательство по ведению сельскохозяйственного производства начиная с первого года приобретения)	Мораторий на отчуждение земель в течение 10 лет с момента приобретения (обязательство по ведению сельскохозяйственного производства начиная с первого года приобретения)	Ориентация на зональную систему земледелия с учетом природно-ресурсного потенциала

Рис. 8 ▲

Мероприятия, направленные на рациональное использование ЗСХН

Fig. 8

Activities aimed at the rational use of agricultural lands

**Рис. 9**

Зонирование Новгородской области по качеству ЗСХН

**Fig. 9**

Zoning of the Novgorod region according to the quality of agricultural lands



**Условные обозначения**

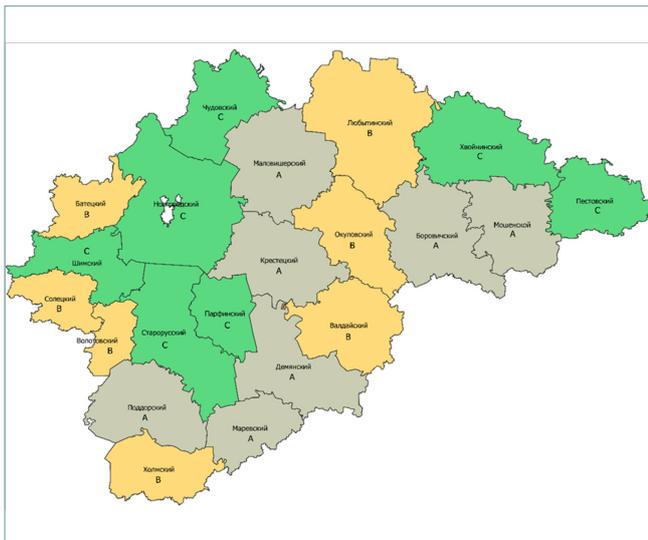
- I – худшее качество (интегральный показатель – 55–76 баллов)
- II – среднее качество (интегральный показатель – 77–81 балл)
- III – лучшее качество (интегральный показатель – 82–86 баллов)

**Рис. 10**

Зонирование Новгородской области по технико-экономическим показателям хозяйственной деятельности на ЗСХН

**Fig. 10**

Zoning of the Novgorod region according to technical and economic indicators of economic activity at agricultural lands



**Условные обозначения**

- А – типичное использование (интегральный показатель – 43–54 балла)
- В – умеренно ресурсосберегающее использование (интегральный показатель – 55–66 баллов)
- С – интенсивно ресурсосберегающее использование (интегральный показатель – 67–78 баллов)

## 4 Выводы

В результате произведенной автоматизации алгоритма интегральной оценки рационального использования ЗСХН осуществлено зонирование территории Новгородской области по качеству и хозяйственной деятельности на ЗСХН в QGIS, представленное на рис. 9, 10.

Результаты исследования показали несоответствие между традиционным агроклиматическим районированием и реальным качеством сельскохозяйственных земель в регионе. В частности, 8 районов демонстрируют низкие качественные показатели ЗСХН.

На рис. 11 представлены результаты анализа использования ЗСХН в Новгородской области с применением разработанной автоматизированной системы оценки.

После апробации разработанного алгоритма для оценки рационального использования ЗСХН в Новгородской области была проведена комплексная оценка потенциала региона, а также выделены районы с различными уровнями использования своих земель. На основании сопоставления групп показателей, включенных в систему показателей рационального использования ЗСХН, можно установить, какие факторы препятствуют развитию сельского хозяйства в конкретных районах.

**Рис. 11**

Зонирование Новгородской области по рациональному использованию ЗСХН

**Fig. 11**

Zoning of the Novgorod Region for the rational use of protected natural areas



**Условные обозначения**

- III-B, III-A, II-A – депрессивные районы
- III-C, II-B, I-A – стабильные районы
- II-C, I-C, I-B – прогрессивные районы

Негативные процессы в Новгородской области требуют срочного вмешательства. Закрытие аграрных предприятий, нерациональное использование ЗСХН и миграция жителей в другие регионы создают серьезные проблемы. Хотя область демонстрирует определенную стабильность, темпы развития аграрного сектора остаются невысокими. Для преодоления этих трудностей и оптимизации использования сельскохозяйственных земель необходимо реализовать специальную программу целевых мероприятий в районах области. Районы, которые изначально были стабильными, могут стать депрессивными из-за обострения социально-экономической обстановки.

**БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Баранова Д.В., Белоусов А.О., Павлова В.А. Алгоритм оценки рационального использования земель сельскохозяйственного назначения // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2024. № 12(279). С. 60–66. DOI:10.24412/2072-4098-2024-12279-60-66.
2. Волков С.Н., Черкашина Е.В., Шаповалов Д.А. и др. Землеустроительное обеспечение ввода в хозяйственный оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации (теория и практика): монография. М.: ГУЗ, 2020. 484 с.
3. Дмитриева М.В., Бармин А.Н., Сизов А.П. и др. Организация рационального землепользования на основе геоэкологического анализа эколого-хозяйственного состояния земель: монография. Астрахань: Сорокин Роман Васильевич, 2021. 152 с.
4. Сулин М.А. Современные проблемы землеустройства: монография. СПб.: Лань, 2020. 172 с.
5. Дубровский А.В. Критерии рационального использования земельных ресурсов // Сборник материалов XVI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. Т. 3. № 2. С. 50–56. DOI:10.33764/2618-981X-2020-3-2-50-56.
6. Карпик А.П., Жарников В.Б., Ларионов Ю.С. Рациональное землепользование в системе современного пространственного развития страны, его основные принципы и механизмы // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24. № 4. С. 232–246. DOI:10.33764/2411-1759-2019-24-4-232-246.
7. Уварова Е.Л. Применение цифровых технологий при проведении мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29. № 6. С. 165–177. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-6-165-177.
8. Белоруццева Е.В. Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения Нечерноземья с применением ГИС-технологий: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2013. 133 с.
9. Лопырев М.И. Модификация внутрихозяйственного землеустройства // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2021. Т. 1. № 12. С. 9–12.
10. Мамонтова И.Ю. Рациональное использование и охрана земель сельскохозяйственного назначения // International Agricultural Journal. 2020. Т. 63. № 1. С. 170–181. DOI:10.24411/2588-0209-2020-10144.
11. Рогатнев Ю.М., Меданова К.В. Пути повышения доходности использования земель сельскохозяйственных организаций в условиях выраженной их разнокачественности // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2021. № 3. С. 172–179. DOI:10.33920/sel-04-2103-02.
12. Дмитрук Н.Г. О развитии сельского туризма в муниципальных районах Новгородской области // Вестник Новгородского филиала РАНХиГС. 2018. Т. 7. № 1–1(9). С. 116–124.

**АВТОРЫ****Баранова Дарья Владимировна**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (СПбГАУ), Санкт-Петербург, Россия

кафедра землеустройства, Институт строительства, природообустройства и ландшафтной архитектуры

канд. техн. наук

 0000-0001-8706-5314

**Белоусов Артём Олегович**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (СПбГАУ),  
Санкт-Петербург, Россия  
кафедра землеустройства, Институт строительства, природообустройства  
и ландшафтной архитектуры  
канд. техн. наук  
 0000-0001-6785-1131

**Павлова Виктория Александровна**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (СПбГАУ),  
Санкт-Петербург, Россия  
кафедра землеустройства, Институт строительства, природообустройства  
и ландшафтной архитектуры  
д-р экон. наук, доцент  
 0000-0001-9915-4058

Поступила 28.02.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликована 30.06.2025.



# Automation of calculations of the integrated assessment of the rational use of agricultural land (using the example of the Novgorod region)

Daria V. Baranova<sup>1</sup>✉, Artem O. Belousov<sup>1</sup>, Victoriia A. Pavlova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia  
✉ evbaranova2010@yandex.ru

**CITATION** Baranova DV, Belousov AO, Pavlova VA. Automation of calculations of the integrated assessment of the rational use of agricultural land (using the example of the Novgorod region). *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 122–135. DOI:10.30533/GiA-2025-031.

**KEYWORDS** agricultural lands, rational use of land, integrated assessment, geoinformation system, quality indicators, technical and economic indicators of economic activity

**ABSTRACT** The article is devoted to the problem of rational use of agricultural lands, which is currently quite relevant due to the current negative trend towards their withdrawal from economic circulation and the development of degradation processes on such lands. To solve this problem, the authors have developed technical solutions for automating the algorithm for assessing the rational use of agricultural land in the geographic information system QGIS. The algorithm is based on the development of a system of indicators for the rational use of land, which takes into account the qualitative characteristics of agricultural land and the technical and economic indicators of economic activity on such lands; the translation of indicator values into a single scoring scale, their clustering and the determination of integral estimates using formulas in the Python programming language; zoning of the territory based on the results of calculations of integral assessments for depressed, stable and progressive groups, with the development of a specific list of measures for each group aimed at the rational use of agricultural land. The approbation of the developed algorithm was carried out on the territory of the Novgorod region, in which, according to the results of the study, economic entities using their lands rationally and irrationally were identified.

**REFERENCES** 1. Baranova DV, Belousov AO, Pavlova VA. Algoritm ocenki racional'nogo ispol'zovaniya zemel' sel'skohozyajstvennogo naznachenija [Algorithm for assessing the rational use of agricultural land]. *Property Relations in the Russian Federation*. 2024;12(279): 60–66. (In Russian). DOI:10.24412/2072-4098-2024-12279-60-66.

2. Volkov SN, Cherkashina EV, Shapovalov DA, et al. Zemleustroitel'noe obespechenie vvoda v hozhajstvennyj oborot neispol'zuemykh zemel' sel'skohozhajstvennogo naznachenija Rossijskoj Federacii (teorija i praktika) [Land management support for the introduction into economic circulation of unused agricultural lands of the Russian Federation (theory and practice)] [monograph]. Moscow: GUZ, 2020. 484 p. (In Russian).
3. Dmitrieva MV, Barmin AN, Sizov AP, et al. *Organizacija racional'nogo zemlepol'zovanija na osnove geojekologicheskogo analiza jekologo-hozhajstvennogo sostojanija zemel'* [Organization of rational land use based on geoecological analysis of the ecological and economic condition of lands] [monograph]. Astrakhan: Sorokin Roman Vasilyevich, 2021. 152 p. (In Russian).
4. Sulin MA. *Sovremennye problemy zemleustrojstva* [Modern Problems of Land Management] [monograph]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2020. 172 p. (In Russian).
5. Dubrovsky AV. Kriterii racional'nogo ispol'zovanija zemel'nyh resursov [Criteria of rational use of land resources]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVI International scientific congress*. In 8 vols. Novosibirsk: SSUGT; 2020;3(2): 50–56. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2020-3-2-50-56.
6. Karpik AP, Zharnikov VB, Larionov YuS. Racional'noe zemlepol'zovanie v sisteme sovremennogo prostranstvennogo razvitija strany, ego osnovnye principy i mehanizmy [Rational land use in the system of modern spatial development of the country, its basic principles and mechanisms]. *Vestnik SSUGT*. 2019;24(4): 232–246. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2019-24-4-232-246.
7. Uvarova EL. Primenenie cifrovych tehnologij pri provedenii monitoringa zemel' sel'skohozhajstvennogo naznachenija [Application of digital technologies in monitoring agricultural lands]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(6): 165–177. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-6-165-177.
8. Belorustseva EV. *Monitoring zemel' sel'skohozhajstvennogo naznachenija Nechernozem'ja s primeneniem GIS-tehnologij* [Monitoring of agricultural lands in the Non-Chernozem region using GIS technologies] [dissertation]. Moscow, 2013. 133 p. (In Russian).
9. Lopyrev MI. Modifikacija vnutrihozhajstvennogo zemleustrojstva [Modification of on-farm land management]. *Models and technologies of environmental management (regional aspect)*. 2021;1(12): 9–12. (In Russian).
10. Mamontova IY. Racional'noe ispol'zovanie i ohrana zemel' sel'skohozhajstvennogo naznachenija [Rational use and protection of agricultural lands]. *International Agricultural Journal*. 2020;63(1): 170–181. (In Russian). DOI:10.24411/2588-0209-2020-10144.
11. Rogatnev YuM, Medanova KV. Puti povyshenija dohodnosti ispol'zovanija zemel' sel'skohozhajstvennykh organizacij v uslovijah vyrazhennoj ih raznokachestvennosti [Ways to increase the profitability of agricultural land use organizations in conditions of their pronounced heterogeneity]. *Land management, cadastre and land monitoring*. 2021;3: 172–179. (In Russian). DOI:10.33920/sel-04-2103-02.
12. Dmitruk NG. O razvitanii sel'skogo turizma v municipal'nyh rajonah Novgorodskoj oblasti [On the development of rural tourism in the municipal districts of the Novgorod region]. *Bulletin of the Novgorod branch of the RANEP*. 2018;7(1-1(9)): 116–124. (In Russian).

**AUTHORS Daria V. Baranova**

Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia  
 Department of Land Management, Institute of Construction, Environmental Management and Landscape Architecture  
 PhD in Engineering  
 0000-0001-8706-5314

**Artem O. Belousov**

Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia  
 Department of Land Management, Institute of Construction, Environmental Management and Landscape Architecture  
 PhD in Engineering  
 0000-0001-6785-1131

**Victoriia A. Pavlova**

Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia

Department of Land Management, Institute of Construction, Environmental Management  
and Landscape Architecture

Dr. of Sci. (Economics), Associate Professor

 0000-0001-9915-4058

**Submitted: February 28, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.**



# Сравнительный анализ моделей прогнозирования рыночной стоимости жилой недвижимости и влияние динамики рынка на кадастровую стоимость

А.А. Шалагин<sup>1</sup>✉, С.А. Григорьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
✉ alexru17@yandex.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Шалагин А.А., Григорьев С.А. Сравнительный анализ моделей прогнозирования рыночной стоимости жилой недвижимости и влияние динамики рынка на кадастровую стоимость // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 136–150. DOI:10.30533/GiA-2025-019.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** прогнозирование, рыночная стоимость, кадастровая стоимость, жилая недвижимость, эконометрические модели, стохастическая биномиальная модель

**АННОТАЦИЯ** В статье рассматривается прогнозирование рыночной стоимости жилой недвижимости с акцентом на однокомнатные квартиры в Выборгском районе города Санкт-Петербурга. Авторы сравнивают классические эконометрические модели прогнозирования, такие как ARIMA (*англ.* Autoregressive Integrated Moving Average) и VAR (*англ.* Vector Autoregression), с неклассическим методом прогнозирования, таким как стохастическая биномиальная модель. Результаты показывают, что эконометрическая модель MA (3) демонстрирует наименьшую абсолютную ошибку прогнозирования, что свидетельствует о возможном практическом применении данной модели. Особое внимание в исследовании уделяется связи между рыночной и кадастровой стоимостью недвижимости. Кадастровая стоимость зависит от рыночной с определенным временным лагом. Рыночная стоимость недвижимости более чувствительна к изменениям спроса и предложения, а также к внешним экономическим факторам, что приводит к расхождениям с государственной кадастровой оценкой. Результаты проведенного исследования подчеркивают важность для участников рынка недвижимости точного прогнозирования, которое позволяет лучше понимать динамику цен, а также сводить к минимуму временное расхождение между кадастровой и рыночной стоимостью.

# 1 Введение

Кадастровая стоимость недвижимости принципиально отличается от рыночной стоимости, хотя и определяется на основе рыночных данных. Кадастровая оценка проводится на основе данных массовой оценки с использованием статистических методов, учитывающих определенный набор ценообразующих факторов [1]. Однако эти факторы и методы могут не полностью отражать текущую конъюнктуру рынка, приводя к расхождению между кадастровой и рыночной стоимостью [2]. Рыночная оценка, в свою очередь, является индивидуальной, при которой используется более широкий перечень ценообразующих факторов. Рыночная стоимость, в отличие от кадастровой, более остро реагирует на изменения спроса, предложения, внешней экономической ситуации и другие факторы. Поэтому рыночная стоимость является более точным показателем реальной цены недвижимости [3].

Проблема прогнозирования стоимости недвижимости остается крайне актуальной, особенно в контексте значительного разрыва между рыночной и кадастровой стоимостью объектов недвижимости. Точное прогнозирование будущей рыночной стоимости необходимо для минимизации рисков и принятия обоснованных решений всеми участниками рынка. Это актуально не только для государственных органов и застройщиков, но и для обычных граждан и инвесторов. Граждане могут использовать прогнозы для оптимизации своих сделок купли-продажи, избегая переплат или недополучения прибыли. Для государства точное прогнозирование рыночной стоимости недвижимости является ключом к преодолению расхождения с кадастровой оценкой. Точное прогнозирование изменения рыночной стоимости недвижимости позволит:

- 1) разрабатывать более справедливые механизмы налогообложения, основанные на реальном состоянии рынка;
- 2) принимать взвешенные решения о государственном инвестировании в строительство, избегая перекосов и неэффективного распределения ресурсов;
- 3) своевременно корректировать кадастровую оценку, приближая ее к рыночной стоимости и обеспечивая прозрачность налогообложения.

Прогнозирование будущей рыночной стоимости позволит государству более точно планировать поступления в бюджет от налогов на недвижимость, минимизируя возможные дефициты или переизбытки.

Стоимость недвижимости складывается из множества факторов: качественных характеристик объекта (размер, площадь, этажность, материалы и пр.); имущественных прав (права собственности, ограничения и пр.); экономических показателей (доходность от сдачи в аренду, издержки содержания и пр.); характеристик окружающей среды (экология, транспортная инфраструктура и пр.); пространственного расположения объектов; динамики рынка [4]. Кроме того, на ценообразование могут влиять внешние факторы, такие как экономическая ситуация в стране, политическая стабильность, изменения в законодательстве и т. д. В данном исследовании основное внимание уделяется прогнозированию рыночной стоимости недвижимости, так как данные по ней более актуальны. Однако параллель между рыночной и кадастровой стоимостью будет сохранена, поскольку изменения рыночной стоимости в дальнейшем приводят к изменениям в кадастровой стоимости. Можно сказать, что кадастровая стоимость зависит от рыночной с определенным временным лагом [3].

Следует отметить, что методы и модели прогнозирования ценовой ситуации на рынке недвижимости постоянно развиваются, и с каждым годом появляется все больше исследований, посвященных данной теме [3–5]. Однако в подавляющем большинстве работ применяются модели, основанные на временных рядах. Главными недостатками данных моделей являются: влияние большого количества временных факторов; использование обобщенного показателя средневзвешенной рыночной стоимости для обширной области исследования; оторванность от пространственной привязки [4–5].

Будущую стоимость недвижимости не всегда можно спрогнозировать с помощью классических методов, таких как метод наименьших квадратов или эконометрические модели, основанные на временных рядах, например ARIMA (*англ.* Autoregressive Integrated Moving Average) или VAR (*англ.* Vector Autoregression). Нами проведен сравнительный анализ классических методов прогнозирования и неклассического метода, такого как стохастическая биномиальная модель.

Целью данного исследования является сравнительный анализ моделей прогнозирования рыночной стоимости жилой недвижимости и выявление временного отставания между рыночной и кадастровой стоимостью на примере однокомнатных квартир в Выборгском районе города Санкт-Петербурга. Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

- раскрыть сущность классических и неклассических методов прогнозирования;
- собрать необходимую для анализа информацию;
- построить прогнозы рыночной стоимости с помощью различных методов и оценить результаты;
- выявить временное отставание между рыночной и кадастровой стоимостью.

## 2 Материалы и методы

Перед описанием моделей прогнозирования рыночной стоимости жилой недвижимости, которые используются в данном исследовании, необходимо добавить, что данные модели строятся на основе средневзвешенных показателей рыночной стоимости, а значит, в данных моделях не учитываются физические характеристики объектов, имущественные права и т. д. Для учета данных факторов необходима разработка более сложных моделей прогнозирования, опирающихся не только на физические характеристики объектов и их местоположение, но и на динамику рынка. Подобные модели могут быть составлены, например, если в пространственно-авторегрессионных моделях будет учитываться фактор динамики рынка, что является непростой задачей. Вопрос разработки моделей прогнозирования рыночной стоимости, учитывающих как физические характеристики объектов, так и динамику рынка, является актуальным и требует более детального изучения. В данной работе описание подобных моделей не приведено, поскольку она посвящена моделям, основанным на прогнозировании временных рядов.

В предлагаемом исследовании под классическими методами прогнозирования понимаются методы, основанные на анализе временных рядов. Сюда можно отнести эконометрические модели ARIMA или VAR.

**Модель ARIMA** — это статистический метод прогнозирования временных рядов [6]. Он основывается на том, что прошлые значения временного ряда могут быть использованы для предсказания его будущих значений. Модель ARIMA — это расширение моделей типа ARMA (*англ.* Autoregressive Moving Average) на нестационарные временные ряды, которые могут стать стационарными после применения процедуры дифференцирования ряда.

Модель ARIMA ( $p, d, q$ ) для ряда  $Y_t$  определяется как модель ARMA ( $p, q$ ) для ряда разностей порядка  $d$  ряда  $Y_t$ . Модель ARMA ( $p, q$ ) имеет следующий общий вид [7]:

$$1 \quad Y_t = \Theta_0 + \Theta_1 Y_{t-1} + \dots + \Theta_p Y_{t-p} + \varepsilon_t - \omega_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \omega_q \varepsilon_{t-q},$$

где  $Y_t$  — значение временного ряда в момент времени  $t$  (зависимая переменная);  $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p}$  — уровни временного ряда в моменты времени  $t-1, t-2, \dots, t-p$  соответственно (независимые переменные);  $\Theta_0, \Theta_1, \dots, \Theta_p$  — оцениваемые коэффициенты для компоненты AR;

$\varepsilon_t$  — гауссовский белый шум (случайное возмущение, описывающее влияние переменных, не учтенных в модели);

$\varepsilon_{t-i}$  — значения остатков  $i$  временных периодов назад (независимые переменные);

$\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_q$  — оцениваемые коэффициенты для компоненты МА.

Модели скользящего среднего МА дают прогноз значений функции  $Y_t$  на основе линейной комбинации ограниченного числа  $q$  остатков, в то время как авторегрессионные модели AR дают прогноз значения  $Y_t$  на основании линейной функции аппроксимации ограниченного числа  $p$  прошлых значений  $Y_t$  [6].

Можно выделить следующие преимущества модели ARIMA: хорошо работает для прогнозирования временных рядов с линейными зависимостями; проста в реализации и интерпретации; широко используется в различных областях, таких как финансы, маркетинг, прогнозирование спроса и т. д. К недостаткам модели ARIMA можно отнести то, что она не подходит для прогнозирования нелинейных временных рядов; требует стационарности временного ряда; может быть нестабильной, если данные нестационарны.

Модель VAR — это многомерное расширение модели AR для временных рядов, использующее несколько взаимозависимых временных рядов [4]. В модели VAR предполагается, что каждое переменное в системе является функцией своих собственных прошлых значений и прошлых значений других переменных в системе [7]. Используя векторно-матричную форму записи, VAR-модель можно представить в следующем виде [7]:

$$2 \quad Y_t = a_0 + \sum_{m=1}^p A_m Y_{t-m} + \sum_{n=0}^q B_n X_{t-n} + \varepsilon_t,$$

где  $Y_t$  — вектор эндогенных переменных;

$X_t$  — вектор экзогенных переменных (опционально);

$p$  — максимальное количество лагов эндогенных переменных;

$q$  — максимальное количество лагов экзогенных переменных;

$A$  и  $B$  — матрицы коэффициентов;

$\varepsilon_t$  — гауссовский белый шум (случайное возмущение, описывающее влияние переменных, не учтенных в модели).

С эконометрической точки зрения оценка подобного рода моделей обычно производится с помощью метода наименьших квадратов.

Можно выделить следующие преимущества модели VAR: многомерный подход, позволяющий изучать связи между несколькими временными рядами; возможность анализировать импульсные реакции и прогнозные ошибки; широкое применение в различных областях. К недостаткам модели VAR относится то, что она требует стационарности временных рядов; может быть сложной в реализации для больших систем; может быть неэффективной при наличии нелинейных зависимостей между временными рядами.

Важной проблемой, возникающей при оценке VAR-моделей, является большое количество коэффициентов, которое быстро растет с увеличением числа используемых в модели переменных — так называемая чрезмерная параметризация [8]. Это означает, что возможное количество переменных в VAR-моделях является ограниченным.

Рассмотрим один из некоторых неклассических методов прогнозирования, основанный на стохастическом моделировании. В данном исследовании под биномиальной моделью понимается случайный процесс  $X(\omega, t)$ , определенный на множестве

$$3 \quad V = \{t_0, t_0 + h, t_0 + 2h, \dots, t_0 + kh, \dots\},$$

где  $h > 0$  [9].

При этом должны выполняться условия (4), (5):

$$4 \quad X(\omega, t) = x,$$

где  $x$  — некоторое заданное вещественное число,

5 ▶ 
$$X(\omega, t_0 + kh) = X(\omega, t_0 + h(k - 1))\varepsilon_k(\omega), k = 1, 2, \dots,$$

где случайные величины  $\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_k(\omega), \dots$  независимы и принимают следующие значения [9]:

6 ▶ 
$$\varepsilon_k(\omega) = \begin{cases} u, & \text{с вероятностью } p, \\ d, & \text{с вероятностью } (1 - p), \end{cases} \quad u > 1; 0 < d < 1.$$

Если выполняются все ранее перечисленные условия, то для случайного процесса  $X(\omega, t)$ , являющегося биномиальной моделью, математическое ожидание можно найти по формуле (7) [9]:

7 ▶ 
$$M_x(t_0 + kh) = x[up + d(1 - p)]^k,$$

где  $x$  — некоторое заданное вещественное число;  
 $p$  — вероятность наступления события;  
 $u$  — коэффициент повышения;  
 $d$  — коэффициент понижения;  
 $k$  — количество периодов ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ).

Основное преимущество биномиальной модели заключается в ее простоте и опоре на рыночные данные без применения сложного математического аппарата или специализированного программного обеспечения. Главным недостатком биномиальной модели является то, что вероятность наступления благоприятного или неблагоприятного события носит стохастический характер, что требует особого внимания [10].

**Рис. 1** ▼  
 График изменения цены 1 м<sup>2</sup> для однокомнатных квартир в Выборгском районе г. Санкт-Петербурга

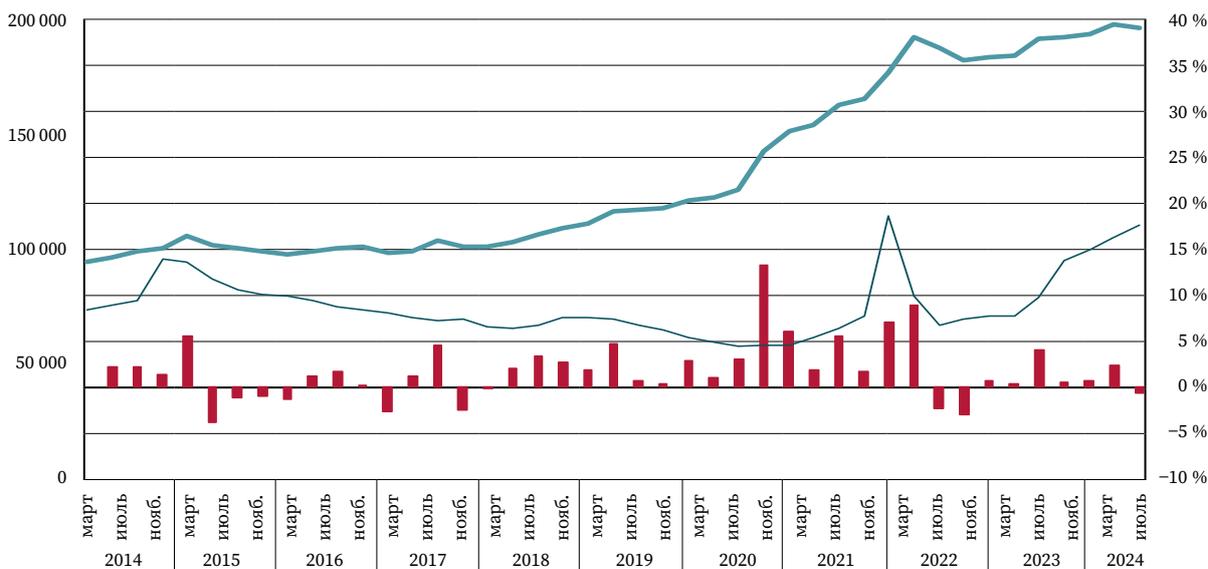
**Fig. 1**  
 The schedule of price changes of 1 m<sup>2</sup> for one-room apartments in the Vyborgsky district of St. Petersburg

**Условные обозначения**  
■ цепной темп роста, %  
— цена 1 м<sup>2</sup>  
— изменения максимальной процентной ставки по депозитам, % годовых

## 2.1 Данные для анализа

Перед практическим применением описанных ранее моделей проведем анализ ценовой ситуации на вторичном рынке жилья в Выборгском районе города Санкт-Петербурга. Все данные о ценовой ситуации для однокомнатных квартир получены с сайта Центра аналитики ГК «Бюллетень недвижимости»<sup>1</sup>. На рис. 1 приведен график изменения средневзвешенной рыночной стоимости однокомнатных квартир в Выборгском районе с марта 2014 года по ноябрь 2024 года. Представленный на рис. 1 график показывает, что с 3-го квартала

Изменение рыночной стоимости однокомнатных квартир в Выборгском районе г. Санкт-Петербурга



1 Аналитика рынка недвижимости Санкт-Петербурга // Центр аналитики ГК «Бюллетень недвижимости»: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bn.ru/analytics/> (дата обращения: 14.11.2024).

2022 года рыночная стоимость однокомнатных квартир в Выборгском районе падала, однако с 1-го квартала 2023 года наблюдается тренд к увеличению рыночной стоимости. В ходе анализа данных также было обнаружено, что к концу 2023 года средняя рыночная стоимость однокомнатных квартир в Выборгском районе вернулась на уровень начала 2022 года и продолжает расти. При этом темп роста сильно замедлился по сравнению с прошлыми периодами.

На рис. 1 также дополнительно приведен график изменения максимальной ставки по депозитам (данные были получены с сайта Центра аналитики ГК «Бюллетень недвижимости»). При визуальном сравнении данных графиков можно заметить, что при уменьшении ставки по депозитам рыночная стоимость квартир начинает расти. Например, в ноябре 2020 года была отмечена самая низкая ставка по депозитам — 4,40 % годовых, ключевая ставка Банка России составляла 4,25 %<sup>2</sup>, при этом в декабре 2020 года наблюдается резкое повышение средневзвешенной рыночной стоимости однокомнатных квартир на 13,16 %. Можно также увидеть и обратную картину: при повышении ставки по депозитам рыночная стоимость квартир начинает незначительно падать или переходить в состояние стагнации. Например, в 1-м квартале 2022 года наблюдается повышение ставки по депозитам, при этом только в 3-м квартале 2022 года происходит падение цены. Как только ставка по депозитам снижается, рыночная стоимость снова начинает расти.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно предположить, что на рыночную стоимость недвижимости влияет такой экономический фактор, как максимальная ставка по депозитам. Необходимо отметить, что данное явление происходит с определенным временным лагом, т. е. при повышении или снижении ставки по депозитам рыночная стоимость может измениться только спустя некоторое время. Данное предположение будет проверено с помощью модели VAR.

## 2.2 Составление прогнозных моделей

Для рассмотрения практического применения описанных ранее моделей зададим границы прогнозирования. Поскольку наиболее интересным для анализа является 2024 год, при этом данные об изменении рыночной стоимости в Выборгском районе за первые три квартала этого года уже известны, построим прогноз на конец 4-го квартала 2024 года. Построение прогнозов и проверка построенных моделей ARIMA и VAR на статистическую значимость будут производиться в специализированной программе `gretl`.

Построим прогноз с помощью модели ARIMA. Сначала необходимо проверить временной ряд «средневзвешенная рыночная стоимость на стационарность». В программе данный ряд имеет название `price`. Воспользуемся ADF-тестом и тестом KPSS (нулевая гипотеза — единичный корень, ряд не стационарен; альтернативная гипотеза — стационарность ряда). В ходе проверки временного ряда на стационарность было обнаружено, что сам ряд и его первая разность не стационарны. С помощью ADF-теста и теста KPSS было проверено, что вторая разность ряда `price` стационарна. Дополнительный тест на автокорреляцию показал ее отсутствие, а значит, интегрирован ряд `price` 2-го порядка. Далее с помощью анализа коррелограммы и многочисленной проверки моделей была обнаружена оптимальная модель для прогнозирования — ARIMA (0; 2; 4), т. е. вся модель сводится к обычной модели со скользящим средним MA (3) для второй разности ряда `price`. Общее описание модели приведено на рис. 2.

В данной модели коэффициенты более статистически значимы (т. е. коэффициенты значимы согласно значениям P-вероятностей для меньшего уровня значимости), а также в пользу данной модели свидетельствуют значения информационных критериев Акайке, Шварца, Хеннана — Куинна, так как они меньше,

<sup>2</sup> Ключевая ставка Банка России // Банк России: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://cbr.ru/hd\\_base/KeyRate](https://cbr.ru/hd_base/KeyRate) (дата обращения: 14.11.2024).

**Рис. 2** ➔

Модель MA (3) для второй разности ряда price

**Fig. 2**

The MA (3) model for the second difference of the price series

Оценок функции: 39  
Оценок градиента: 16

Модель 1: ARIMA, использованы наблюдения 2014:3–2024:3 (T = 41)  
Оценено с помощью AS 197 (точный метод МП)  
Зависимая переменная: (1-L)^2 price  
Стандартные ошибки рассчитаны на основе матрицы внешнего произведения

	коэффициент	ст. ошибка	z	p-значение	
theta_1	-0,387487	0,151992	-2,549	0,0108	**
theta_2	-0,771796	0,142734	-5,407	6,40e-08	***
theta_3	0,431151	0,155768	2,768	0,0056	***

Среднее завис. перемен	-83,68293	Ст. откл. завис. перем	5767,681
Среднее инноваций	-6,854184	Ст. откл. инноваций	4209,542
R-квадрат	0,988380	Исправ. R-квадрат	0,987769
Лог. правдоподобие	-401,4710	Крит. Акаике	810,9420
Крит. Шварца	817,7963	Крит. Хеннана-Куинна	813,4380

обратите внимание на сокращенные обозначения статистики

	Действ. часть	Мним. часть	Модуль	Частота
МА				
Корень 1	1,4306	0,3451	1,4716	0,0377
Корень 2	1,4306	-0,3451	1,4716	-0,0377
Корень 3	-1,0710	0,0000	1,0710	0,5000

LM тест на наличие автокорреляции до порядка 6 -  
Нулевая гипотеза: автокорреляция отсутствует  
Тестовая статистика: Хи-квадрат(3) = 3,10485

чем в других моделях. Логарифм правдоподобия в данной модели больше, чем во всех остальных. В данной модели отсутствует автокорреляция. Корни характеристического уравнения по модулю больше 1. В табл. 1 приведены результаты построения прогноза рыночной стоимости для однокомнатных квартир в Выборгском районе города Санкт-Петербурга на 4-й квартал 2024 года с помощью модели MA (3).

**Таблица 1** ➔

Результаты прогнозирования по модели MA (3)

**Table 1**

Forecasting results based on the MA (3) model

Наблюдение	Price	Прогнозирование	Статистическая ошибка	95%-ный доверительный интервал
2024:3	200 515	202 813	не определено	
2024:4	не определено	201 657	4209	(193 406 – 209 907)

Построим прогноз с помощью модели VAR. Первым делом проведем тест Грейнджера на наличие коинтеграции между рядами: price (цена) и deposit (ставка по депозитам). Как показал результат теста, между рядами price и deposit есть причинность по Грейнджеру, а значит, можно построить модель VAR. На рис. 3 представлены результаты внутреннего теста по выбору порядка лагов для модели VAR.

**Рис. 3** ➔

Тест на выбор порядка лагов для модели VAR

**Fig. 3**

A test for choosing the lag order for the VAR model

VAR система, максимальный порядок лага 6

Звездочка указывает на наилучшие (минимальные) значения информационных критериев Акаике (AIC), Шварца (BIC) и Хеннана-Куинна (HQС).

лаги	loglik	p(LR)	AIC	BIC	HQС
1	-278,55222		15,381201	15,642431	15,473297
2	-264,92018	0,00002	14,860550*	15,295933*	15,014043*
3	-262,82293	0,38032	14,963402	15,572938	15,178292
4	-258,85086	0,09365	14,964911	15,748601	15,241199
5	-256,40323	0,29822	15,048823	16,006667	15,386508
6	-252,07021	0,07001	15,030822	16,162818	15,429904

Согласно результатам теста, оптимальной является модель VAR (2) с порядком лагов 2. На рис. 4 и 5 приведены результаты построения модели VAR (2).

По результатам составления модели на рис. 4 можно увидеть, что на переменную price влияют ее собственные лаги, а также лаги переменной deposit.

По результатам составления модели на рис. 5 можно увидеть, что на переменную deposit влияют ее собственные лаги, но лаги переменной price не влияют.

**Рис. 4** ➔

Уравнение влияния на переменную price собственных лагов и лагов переменной deposit

**Fig. 4**

The equation of the effect on the price change of the own lags and lags of the deposit variable

Уравнение 1: price

	коэффициент	ст. ошибка	t-статистика	p-значение	
const	5991,72	2487,94	2,408	0,0213	**
price_1	1,22276	0,120993	10,11	4,68e-012	***
price_2	-0,213570	0,124766	-1,712	0,0955	*
Deposit_1	74829,0	24073,1	3,108	0,0037	***
Deposit_2	-139257	25430,0	-5,476	3,49e-06	***
Среднее завис. перемен	137175,0	Ст. откл. завис. перем	38485,87		
Сумма кв. остатков	4,58e+08	Ст. ошибка модели	3566,739		
R-квадрат	0,992270	Исправ. R-квадрат	0,991411		
F(4, 36)	1155,287	P-значение (F)	1,83e-37		
параметр rho	-0,178798	Стат. Дарбина-Уотсона	2,350629		

обратите внимание на сокращенные обозначения статистики

F-тесты для нулевых ограничений:

Все лаги для price	F(2, 36) =	2162,1	[0,0000]
Все лаги для Deposit	F(2, 36) =	15,258	[0,0000]
Все переменные, лаг 2	F(2, 36) =	16,974	[0,0000]

**Рис. 5** ➔

Уравнение влияния на переменную deposit собственных лагов и лагов переменной price

**Fig. 5**

The equation of the effect on the deposit change of the own lags and lags of the price variable

Уравнение 2: Deposit

	коэффициент	ст. ошибка	t-статистика	p-значение	
const	0,00125481	0,0168615	0,07442	0,9411	
price_1	-1,10536e-06	8,20005e-07	-1,348	0,1861	
price_2	1,31230e-06	8,45574e-07	1,552	0,1294	
Deposit_1	0,752511	0,163150	4,612	4,88e-05	***
Deposit_2	-0,0275700	0,172346	-0,1600	0,8738	
Среднее завис. перемен	0,088305	Ст. откл. завис. перем	0,035250		
Сумма кв. остатков	0,021036	Ст. ошибка модели	0,024173		
R-квадрат	0,576764	Исправ. R-квадрат	0,529737		
F(4, 36)	12,26471	P-значение (F)	2,16e-06		
параметр rho	0,007942	Стат. Дарбина-Уотсона	1,959563		

обратите внимание на сокращенные обозначения статистики

F-тесты для нулевых ограничений:

Все лаги для price	F(2, 36) =	2,3217	[0,1126]
Все лаги для Deposit	F(2, 36) =	18,281	[0,0000]
Все переменные, лаг 2	F(2, 36) =	1,2076	[0,3107]

Для установления адекватности модели были проверены ее единичные корни (рис. 6). Все обратные корни лежат внутри окружности, а значит, модель стационарна.

Дополнительно также был проведен тест на отсутствие автокорреляции. Автокорреляция в модели отсутствует. В табл. 2 приведены результаты построения прогноза рыночной стоимости для однокомнатных квартир в Выборгском районе города Санкт-Петербурга на 4-й квартал 2024 года с помощью модели VAR (2).

**Таблица 2** ➔

Результаты прогнозирования по модели VAR (2)

**Table 2**

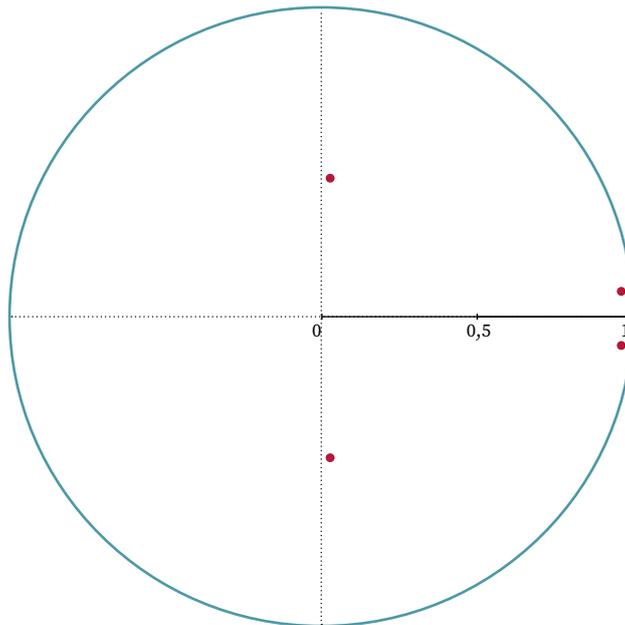
The results of forecasting using the VAR (2) model

Наблюдение	Price	Прогнозирование	Статистическая ошибка	95%-ный доверительный интервал
2024:4	не определено	198 755	3342	191 977 – 205 534

**Рис. 6**  Обратные корни VAR по отношению к единичной окружности

Обратные корни VAR по отношению к единичной окружности

**Fig. 6**  
The inverse roots of VAR with respect to the unit circle



Построим прогноз с помощью биномиальной модели. Поскольку наиболее интересным периодом для анализа и прогнозирования цен на жилье является последний год от даты исследования, построим прогноз с помощью биномиальной модели с декабря 2023 года по декабрь 2024 года и сравним его с фактическими данными, а также с результатами других прогнозов.

По представленным данным рассчитаем среднеквартальный темп роста цены 1 кв. м в Выборгском районе для однокомнатных квартир. С конца 2018 по конец 2023 года он составляет

**в** 

$$\bar{T} = \sqrt[n-1]{\frac{y_n}{y_1}} \times 100 = \sqrt[21-1]{\frac{196095}{111588}} \times 100 = 102,86\%$$

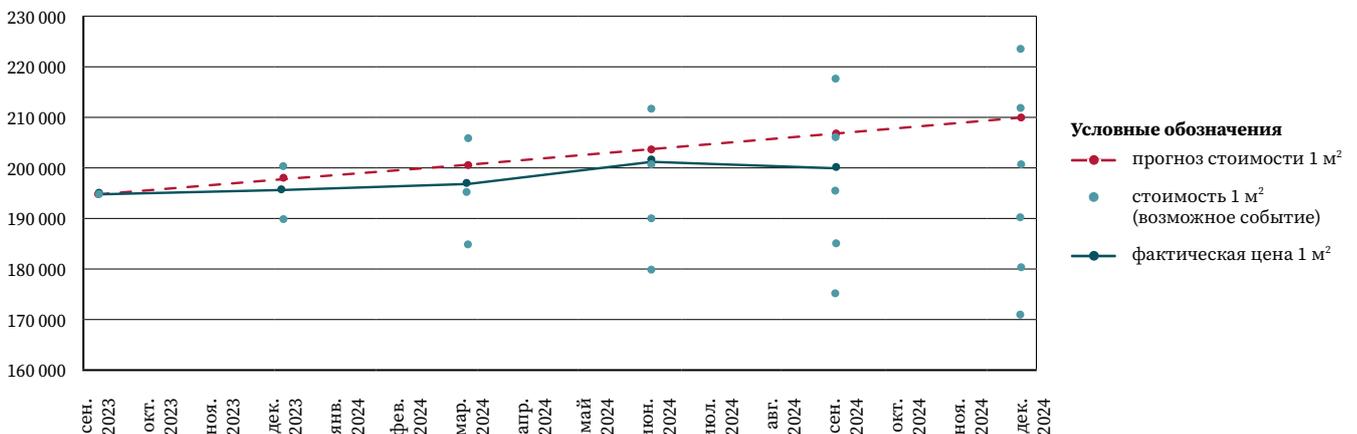
Согласно расчетам, в среднем ежеквартально цена 1 кв. м однокомнатных квартир в Выборгском районе возрастает на 2,86 %.

Зададим параметры биномиальной модели: стоимость недвижимости растет на 2,86 % в квартал ( $u = 1,0286$ ), при неблагоприятных условиях рынка падает на 2,68 % в квартал ( $d = 0,9732$ ); вероятность наступления благоприятного условия будет составлять 76,3 %, так как при ранее проведенном анализе рынка было выяснено, что из 38 рассмотренных периодов стоимость росла в 29 случаях. На рис. 7 изображены траектории изменения средневзвешенной рыночной стоимости 1 кв. м однокомнатных квартир в Выборгском районе, построенные при помощи биномиальной модели при заданных параметрах.

**Рис. 7**  Траектория биномиального процесса ( $x = 195\ 208$ ;  $u = 1,0286$ ;  $d = 0,973$ ) для  $k = 5$

**Fig. 7**  
The trajectory of the binomial process ( $x = 195\ 208$ ;  $u = 1,0286$ ;  $d = 0,973$ ) for  $k = 5$

**Прогноз изменения стоимости 1 м<sup>2</sup>**



По формуле (7) определим математическое ожидание средневзвешенной рыночной стоимости 1 кв. м для однокомнатных квартир в Выборгском районе на декабрь 2024 года:

$$M_x(t_0 + kh) = 195208[1,0286 \times 0,763 + 0,973(1 - 0,763)]^5 = 210793 \text{ руб.}$$

Фактическое значение средневзвешенной рыночной стоимости 1 кв. м в июне 2024 года составляет 201 803 руб. Отклонение прогнозного значения от фактического составляет всего 1,2 %, что довольно незначительно. Такие результаты были достигнуты за счет того, что построение биномиальной модели происходит по данным, полученным при более детальном анализе рынка. Необходимо отметить, что в сентябре 2024 года наблюдается снижение фактической стоимости, при этом модель показывает детерминированный тренд роста цены. Данные результаты можно объяснить спецификой модели. Биномиальная модель рассчитывает средневзвешенное значение прогнозной величины, опираясь на вероятности наступления благоприятного или неблагоприятного события, при этом если вероятность наступления благоприятного выше, то модель будет стремиться строить прогноз с растущим трендом [9]. Однако вероятность наступления благоприятного или неблагоприятного события может носить стохастический характер, что требует особого внимания.

### 3 Результаты и обсуждение

**Таблица 3** 

Общие результаты прогнозирования

**Table 3**

General forecasting results

Проведем сравнительный анализ результатов прогнозирования средневзвешенной стоимости однокомнатных квартир в Выборгском районе города Санкт-Петербурга. В табл. 3 приведены сводные результаты по построению прогнозов. Для чистоты эксперимента модели MA (3) и VAR (2) рассчитывали прогноз от 1-го квартала 2024 года.

Период	Фактическая стоимость	Модель MA (3)		Модель VAR (2)		Биномиальная модель	
		прогноз, руб/м <sup>2</sup>	Δ, руб.	прогноз, руб/м <sup>2</sup>	Δ, руб.	прогноз, руб/м <sup>2</sup>	Δ, руб.
Март 2024 г.	197 284	194 828	-2456	200 832	3548	201 299	4015
Июнь 2024 г.	201 803	202 425	622	197 422	-4381	204 415	2612
Сентябрь 2024 г.	200 515	202 812	2297	202 044	1529	207 580	7065
Декабрь 2024 г.	—	201 656	—	198 755	—	210 793	—
Среднее значение	—	—	1792	—	3153	—	4564

По результатам, приведенным в табл. 3, можно сделать вывод, что наименьшая абсолютная ошибка прогнозирования у модели MA (3): за три прогнозных периода она составила 1792 руб. Несмотря на то что модель VAR (2) имеет меньшую стандартную ошибку прогноза, согласно табл. 2, за прогнозный период с 1-го по 3-й квартал 2024 года абсолютная ошибка прогнозирования составила 3153 руб. Можно также отметить, что обе эконометрические модели показывают снижение средневзвешенной рыночной стоимости 1 кв. м в декабре 2024 года. Биномиальная модель в данном исследовании показала наихудший результат прогнозирования. Хотя эконометрические модели не всегда могут показывать точные прогнозные значения, их способность отражать динамику изменения рынка недвижимости может быть использована в целях корректировки кадастровой стоимости и сокращения временного ценового разрыва между кадастровой и рыночной стоимостью.

В результате государственной кадастровой оценки (ГКО), проведенной в Санкт-Петербурге в 2023 году, эксперты обнаружили большой разрыв между

кадастровой и рыночной стоимостью за период с 2018 по 2022 год. В табл. 4 содержится сравнительный анализ значений рыночной и рассчитанной кадастровой стоимости квартир, располагающихся в многоквартирных домах, по типам домов<sup>3</sup>. Данные, приведенные в табл. 4, позволяют утверждать, что в целом рост кадастровой стоимости жилых помещений, которые не изменили свои характеристики (тип дома) относительно предыдущего тура кадастровой оценки, соответствует тенденции роста рыночных цен за 2018–2022 годы.

Тип дома	Средняя удельная рыночная стоимость, тыс. руб/м <sup>2</sup>		Изменение	Средняя удельная кадастровая стоимость, тыс. руб/м <sup>2</sup>		Изменение
	4-й квартал 2017 г.	Сентябрь – октябрь 2022 г.		На 01.01.2018	На 01.01.2023	
СФ_КР	105,7	214	+102%	94,5	189,7	+101%
КОНСТР	85,0	169,8	+100%	85,5	166,1	+94%
СФ	104,0	205,9	+98%	88,0	185,1	+110%
СТАЛ	104,9	200,6	+91%	99,9	192,2	+92%
ПАН_5эт	80,6	149,8	+86%	80,1	149,2	+86%
ПАН	84,1	156,7	+86%	84,1	154,7	+84%
КИРП_ТИП	93,1	169,9	+82%	93,4	165,7	+77%
НЕМ	86,2	175,2	+103%	86,1	161,7	+88%
КИРП_5эт	87,3	157,2	+80%	88,1	160,8	+83%
ИНД	96,0	178,7	+86%	97,8	177,6	+82%
МАЛЭТ	89,2	165,3	+85%	102,5	178,3	+74%
ПАН_совр	95,4	176,3	+85%	93,0	182,4	+96%
	<b>Среднее значение:</b>		<b>+90%</b>	<b>Среднее значение:</b>		<b>+89%</b>
ЭЛИТА	277,7	426,3	+54%	203,1	418,4	+106%
БИЗНЕС	228,8	370	+62%	180,9	362,3	+100%

**Таблица 4**  Сравнительный анализ значений рыночной и рассчитанной кадастровой стоимости квартир, располагающихся в многоквартирных домах, по типам домов

**Table 4** Comparative analysis of the values of the market and calculated cadastral value of apartments located in apartment buildings by type of houses

Существенные изменения кадастровой стоимости коснулись жилых помещений, располагающихся в многоквартирных домах, жилья повышенного качества, что связано с недооценкой их кадастровой стоимости при проведении ГКО 2018 года и выделением в ГКО 2023 года в отдельную оценочную группу, моделирование стоимости по которой учитывало существующий в настоящее время уровень цен на квартиры в жилье повышенного комфорта.

Как мы можем увидеть в табл. 4, разрыв между средней удельной кадастровой стоимостью на 2018 и на 2023 годы в среднем составляет 89 %. Это говорит о том, что кадастровая стоимость в среднем выросла на 89 % за 5 лет, т. е. рост кадастровой стоимости составляет в среднем 17,8 % в год. Данный разрыв между ценами очень большой. Поскольку кадастровая стоимость в рамках ГКО определяется периодически, но не ежегодно, можно сказать, что в период отсутствия актуальной информации о кадастровой стоимости и временного отставания от динамики рыночной стоимости в бюджете муниципалитетов возникает недополученная прибыль от налогов за недвижимость. Например, если в 2018 году средняя удельная кадастровая стоимость домов типа МАЛЭТ была равна 102,5 тыс. руб/м<sup>2</sup>, то в 2023 году она уже составляла 178,3 тыс. руб/м<sup>2</sup>, рост кадастровой стоимости за 5 лет +74 %, годовой рост в среднем 14,8 %. Предполагается, что в 2019 году

<sup>3</sup> Отчет об определении кадастровой стоимости объектов недвижимости, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Т. 4: Определение кадастровой стоимости помещений и машино-мест. СПб., 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ko.spb.ru/gko2023/v2/?ysclid=mcbtnxve92j63821436> (дата обращения: 21.11.2024).

кадастровая стоимость в данных домах выросла на 14,8 %, однако налог на недвижимость был определен на кадастровую стоимость 2018 года, а значит, муниципалитетом было недополучено 14,8 % налоговых отчислений от данного типа недвижимости. В последующие годы в условиях роста рынка недвижимости недополученная прибыль от налогов за недвижимость только увеличивалась. Этот временной разрыв между кадастровой и рыночной стоимостью недвижимости может быть нивелирован при своевременном проведении ГКО (в данном случае возникает необходимость в разработке универсального и быстрого метода оценки), а также при учете в моделях оценки при ГКО фактора роста рынка (в данном случае необходимо строить прогнозы изменения рыночной стоимости, чтобы понимать динамику рынка недвижимости). Вопрос совершенствования государственной кадастровой оценки является актуальным и требует дополнительных исследований как в части методологии проведения оценки, так и в части учета в моделях оценки фактора роста рынка недвижимости.

## 4 Выводы

В данной статье представлен сравнительный анализ различных моделей прогнозирования рыночной стоимости жилой недвижимости с акцентом на однокомнатные квартиры в Выборгском районе города Санкт-Петербурга. На основе проведенного исследования можно сделать несколько ключевых выводов.

Прогнозирование рыночной стоимости недвижимости является важной задачей, особенно в условиях значительного разрыва между кадастровой и рыночной стоимостью. Это расхождение может привести к неправильным оценкам и, как следствие, к финансовым потерям для участников рынка. Точное прогнозирование необходимо для минимизации рисков и принятия обоснованных решений.

Сравнительный анализ различных моделей прогнозирования, таких как ARIMA, VAR и биномиальная модель, показал, что итоговая эконометрическая модель MA (3) обладает наименьшей абсолютной ошибкой прогнозирования, что свидетельствует о ее высокой точности. Однако каждая модель имеет свои преимущества и недостатки, и выбор подходящей модели должен основываться на специфике данных и целей прогнозирования.

Важно отметить, что внешние экономические условия, такие как колебания депозитных ставок, могут оказывать значительное влияние на стоимость недвижимости, однако с определенным временным лагом. Важно учитывать временные лаги в реакции рынка на изменения этих факторов, что подчеркивает необходимость использования моделей, способных учитывать такие задержки.

В статье подчеркивается, что кадастровая стоимость недвижимости может не полностью отражать текущую конъюнктуру рынка, хотя и определяется на основе рыночных данных. Рыночная стоимость более чувствительна к изменениям спроса и предложения, а также к внешним экономическим факторам. Изменения рыночной стоимости в итоге влияют на кадастровую стоимость, но с определенным временным лагом. Это подчеркивает необходимость учета связи между этими двумя показателями при проведении ГКО. Временной разрыв между кадастровой и рыночной стоимостью недвижимости может быть устранен при нескольких условиях: 1) своевременном проведении ГКО, для целей которой требуется разработать универсальный и быстрый метод оценки; 2) учете в моделях при ГКО фактора роста рынка (необходимо строить прогнозы изменения рыночной стоимости, чтобы понимать динамику рынка недвижимости).

В заключение следует отметить важность комплексного подхода к прогнозированию рыночной стоимости недвижимости, который включает в себя как классические, так и неклассические методы построения прогнозов. Это позволит более точно учитывать динамику рынка и связь между рыночной и кадастровой стоимостью недвижимости, что является ключевым фактором для принятия обоснованных решений в условиях неопределенности.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Ласкин М.Б., Гадасина Л.В. Как определить кадастровую стоимость // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2018. № 3(198). С. 42–53. DOI:10.24411/2072-4098-2018-13001.
  2. Штань М.В. Конфликт между рыночной и кадастровой стоимостями // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2018. № 8(203). С. 34–49.
  3. Ласкин М.Б., Гадасина Л.В., Зайцева Е.А. Кадастровая стоимость как инструмент мониторинга рыночной стоимости недвижимости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2021. Т. 37. № 1. С. 84–108. DOI:10.21638/spbu05.2021.104.
  4. Никитина Н.С. Анализ факторов, влияющих на динамику цен на жилую недвижимость в России // Финансы: теория и практика. 2023. Т. 27. № 1. С. 208–220. DOI:10.26794/2587-5671-2023-27-1-208-220.
  5. Kuchler T., Piazzesi M., Stroebel J. Housing market expectations // Handbook of economic expectations. Academic Press, 2023. P. 163–191. DOI:10.1016/B978-0-12-822927-9.00013-6.
  6. Трегуб А.В., Трегуб И.В. Методика построения модели ARIMA для прогнозирования динамики временных рядов // Лесной вестник. 2011. № 5. С. 179–183.
  7. Brooks C., Tsolacos S. Real estate modelling and forecasting. Cambridge University Press, 2010. 453 p. DOI:10.1017/CBO9780511814235.
  8. Ghysels E., Plazzi A., Valkanov R., et al. Forecasting real estate prices // Handbook of economic forecasting. North Holland, 2013. Vol. 2A. P. 509–580. DOI:10.1016/B978-0-444-53683-9.00009-8.
  9. Yilmaz B., Selcuk-Kestel A. A stochastic approach to model housing markets: The US housing market case // Numerical Algebra Control and Optimization. 2018. Vol. 8. No. 4. P. 481–492. DOI:10.3934/naco.2018030.
  10. Шалагин А.А., Тесаловский А.А. Применение стохастических методов для прогнозирования стоимости недвижимости // Московский экономический журнал. 2023. Т. 8. № 6. С. 624–639. DOI:10.55186/2413046X\_2023\_8\_6\_298.

**АВТОРЫ Шалагин Алексей Александрович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра землеустройства и кадастров, факультет управления территориями  
 0009-0006-6217-5094

**Григорьев Сергей Александрович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра землеустройства и кадастров, факультет управления территориями  
д-р техн. наук, профессор  
 0000-0002-6591-9195

Поступила 26.11.2024. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Comparative analysis of models for forecasting the market value of residential real estate and the impact of market dynamics on cadastral value

Alexey A. Shalagin<sup>1</sup>✉, Sergey A. Grigoriev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
✉ alexru17@yandex.ru

**CITATION** Shalagin AA, Grigoriev SA. Comparative analysis of models for forecasting the market value of residential real estate and the impact of market dynamics on cadastral value. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 136–150. DOI:10.30533/GiA-2025-019.

**KEYWORDS** forecasting, market value, cadastral value, residential housing, econometric models, stochastic binomial model

**ABSTRACT** The article discusses the forecasting of the market value of residential real estate, with an emphasis on one-room apartments in the Vyborg district of St. Petersburg. The author compares classical econometric forecasting models such as ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) and VAR (Vector Autoregression) with a non-classical forecasting method such as the stochastic binomial model. The results show that the econometric model MA (3) demonstrates the smallest absolute forecasting error, which indicates its possible practical application. Special attention is paid to the relationship between the market and cadastral value of real estate. The cadastral value depends on the market value with a certain time lag. The market value of real estate is more sensitive to changes in supply and demand, as well as to external economic factors, which leads to discrepancies with the results of the assessment of SCV. The results of the study emphasize the importance of accurate forecasting for real estate market participants, allowing them to better understand price dynamics and minimize the temporary discrepancy between cadastral and market value.

- REFERENCES**
1. Laskin MB, Gadasina LV. Kak opredelit' kadaastrovuyu stoimost' [How to convert cadastral value]. *Property Relations in the Russian Federation*. 2018;3(198): 42–53. (In Russian). DOI:10.24411/2072-4098-2018-13001.
  2. Shtan' MV. Konflikt mezhdru rynochnoi i kadaastrovoi stoimostyami [Conflict between market and cadastral values]. *Property Relations in the Russian Federation*. 2018;8(203): 34–49. (In Russian).

3. Laskin MB, Gadasina LV, Zaitseva EA. Kadastrrovaya stoimost' kak instrument monitoringa rynochnoi stoimosti nedvizhimosti [The cadastral value as a tool for monitoring the real estate market value]. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2021;37(1): 84–108. (In Russian). DOI:10.21638/spbu05.2021.104.
4. Nikitina NS. Analiz faktorov, vliyayushchikh na dinamiku tsen na zhiluyu nedvizhimost' v Rossii [Analysis of Factors Affecting the Dynamics of Residential Real Estate Prices in Russia]. *Finance: Theory and Practice*. 2023;27(1): 208–220. (In Russian). DOI:10.26794/2587-5671-2023-27-1-208-220.
5. Kuchler T, Piazzesi M, Stroebel J. Housing market expectations. *Handbook of economic expectations*. Academic Press; 2023: 163–191. DOI:10.1016/B978-0-12-822927-9.00013-6.
6. Tregub AV, Tregub IV. Metodika postroeniya modeli ARIMA dlya prognozirovaniya dinamiki vremennykh ryadov [The procedure of construction the arima model for forecasting the time series dynamics]. *Forestry bulletin*. 2011;5: 179–183. (In Russian).
7. Brooks C, Tsolacos S. *Real estate modelling and forecasting*. Cambridge university press; 2010: 453. DOI:10.1017/CBO9780511814235.
8. Ghysels E, Plazzi A, Valkanov R, et al. Forecasting real estate prices. *Handbook of economic forecasting*. North Holland; 2013;2A: 509–580. DOI:10.1016/B978-0-444-53683-9.00009-8.
9. Yilmaz B, Selcuk-Kestel A. A stochastic approach to model housing markets: The US housing market case. *Numerical Algebra Control and Optimization*. 2018;8(4): 481–492. DOI:10.3934/naco.2018030.
10. Shalagin AA, Tesalovskii AA. Primenenie stokhasticheskikh metodov dlya prognozirovaniya stoimosti nedvizhimosti [Application of stochastic methods to forecast the value of real estate]. *Moscow economic journal*. 2023;8(6): 624–639. (In Russian). DOI:10.55186/2413046X\_2023\_8\_6\_298.

**AUTHORS Alexey A. Shalagin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Land Management and Cadastres, Faculty of Territory Management  
 0009-0006-6217-5094

**Sergey A. Grigoriev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Land Management and Cadastres, Faculty of Territory Management  
 Dr. of Sci. (Engineering), Professor  
 0000-0002-6591-9195

Submitted: November 26, 2024. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



## О термине «актуальное геопространство территориального образования»

**Е.И. Аврунев<sup>1</sup>✉, А.В. Артемов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Кемеровский областной кадастровый центр, Кемерово, Россия

✉ avrunev-ei@yandex.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Аврунев Е.И., Артемов А.В. О термине «актуальное геопространство территориального образования» // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 151–159. DOI:10.30533/GiA-2025-033.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** геопространство, структура, структурные элементы, координатное пространство, территориальное образование, актуальность, категория земель, границы объектов недвижимости и землеустройства, Единый государственный реестр недвижимости

**АННОТАЦИЯ** В статье подробно рассматривается понятийный аппарат, применяемый в настоящее время при координатном обеспечении кадастровых работ, которые выполняются для наполнения Единого государственного реестра недвижимости актуальной и достоверной информацией об объектах недвижимости, расположенных на соответствующей территории. Предложен понятийный аппарат, обусловленный проблемной ситуацией, возникшей в результате выполненного в 2022 году Росреестром пересчетом значений координат пунктов государственных геодезических сетей в местную систему координат в ряде регионов Российской Федерации, в том числе на территории Кемеровской области. Предложено и с юридической точки зрения обосновано введение в оборот следующих новых терминов: «территориальное образование», «координатное пространство территориального образования», «деформация координатного пространства», «геопространство территориального образования», «актуальное геопространство территориального образования». При этом рассматривается совместимость предложенного понятийного аппарата с существующими нормативными документами, определяющими требования к выполнению кадастровых работ на территории РФ. Определена структура геопространства территориального образования, в которой выделены элементы (пункты государственных геодезических сетей), образующие координатное пространство.

В отношении этих элементов предложен статистический критерий, позволяющий определить, является или нет геопространство конкретного территориального образования актуальным. На основании разработанного математического алгоритма и соответствующих производственных материалов установлено, что геопространство Кемеровской области не является актуальным.

## 1 Введение

Достоверность и актуальность кадастровой информации об объектах недвижимости, содержащейся в Едином государственном реестре недвижимости (ЕГРН), во многом обуславливаются местоположением, линейными и площадными параметрами<sup>1</sup> [1]. Точность параметров определяется средними квадратическими погрешностями (СКП). Значения СКП зафиксированы в одном из ключевых приказов Росреестра<sup>2</sup>, требования которого обязаны выполнять как кадастровые инженеры, так и сотрудники всех управлений Росреестра, принимающие решения о постановке на государственный кадастровый учет (ГКУ) объектов недвижимости, составляющих структуру соответствующего территориального образования [2–4]. В настоящее время актуальность исследований в этом направлении обусловлена в том числе массовым выполнением комплексных кадастровых работ (ККР) во многих регионах РФ [5].

Получение с заданной нормативной СКП параметров объектов недвижимости зависит от точности координат пунктов государственных геодезических сетей (ГГС), геодезических сетей специального назначения (ГССН), дифференциальных геодезических сетей (ДГС) и геодезических измерений, выполняемых при координировании характерных точек (ХТ), закрепляющих на местности и в виртуальном пространстве границы объектов кадастровых и землеустроительных работ.

Следовательно, для получения актуальной и достоверной информации о параметрах объектов недвижимости требуется, во-первых, рассмотреть понятийный аппарат, используемый в настоящее время при выполнении работ по геодезическому обеспечению ЕГРН, а во-вторых, определить структуру геопространства территориального образования для составления перечня технологических операций, необходимых для его поддержания в актуальном состоянии, которое обеспечивает выполнение требований действующего законодательства.

## 2 Материалы и методы

Термин «геопространство» впервые был предложен А.П. Карпиком [6–9], определившим его как часть физической поверхности Земли, которая подлежит изучению и моделированию в пределах определенной территории и соответствующего периода времени. Было предложено характеризовать геопространство протяженностью, динамичностью, структурностью и непрерывностью.

Динамичность геопространства обусловлена возможным изменением этих характеристик в пространстве и времени. Непрерывность геопространства

1 Сизов А.П., Стыценко Е.А., Хомяков Д.М. и др. Современные проблемы землеустройства и кадастров. Пространственное развитие территорий: учебник. М.: Кнорус, 2022. 218 с.

2 Приказ Минэкономразвития России от 1 марта 2016 г. № 90 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения и помещения». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71274166> (дата обращения: 17.02.2025).

определяется наличием в каждой его точке пространственного объекта, который имеет определенные характеристики (метрические и атрибутивные), являющиеся общими для определенной территории и зафиксированные действующим законодательством. В соответствии с федеральным законодательством о геодезии и картографии и другими нормативными правовыми актами<sup>3</sup>, к пространственным относятся природные, природно-антропогенные, антропогенные и другие объекты (в том числе здания, сооружения), местоположение которых может быть определено в установленной системе координат.

Отметим неоднозначную трактовку термина «определенная территория», которая затрудняет реализацию требования к пространственным объектам иметь общие характеристики в части определения их местоположения. Поэтому представляется целесообразным ввести термин «территориальное образование», привязанный к существующему административно-территориальному и кадастровому делению территории РФ. При такой постановке вопроса структура геопространства приобретает четкую территориальную привязку.

Однако на законодательном уровне регулирования земельно-имущественных отношений термин «территориальное образование» не введен. Большинство нормативно-правовых актов определяет части территории Российской Федерации применительно к существующему административно-территориальному делению (республики, края, области, города федерального значения, автономные области, автономные округа, административные районы, города, внутригородские районы, округа города, поселки городского типа, сельсоветы, сельские населенные пункты)<sup>4</sup>.

Вместе с тем данный термин используется в нормативных актах, регулирующих государственное и муниципальное управление административно-территориальных единиц РФ, в которых он трактуется как часть территории, имеющая границы, правовой статус, органы легитимной власти, бюджет и население. Отметим, что эти границы, как правило, в своем большинстве совпадают с границами кадастрового деления территории РФ.

Резюмируя все вышеизложенное, исходя из логики и структуры выполнения кадастровых работ и существующих нормативно-правовых документов, считаем целесообразным ввести в действующее законодательство термин «геопространство территориального образования» (ГПТО). Под этим термином будем понимать пространственную совокупность объектов недвижимости, местоположение которых с заданной СКП определено в установленной действующим законодательством системе координат<sup>5</sup>, расположенную на территории, определенной кадастровым делением Российской Федерации. Структурными элементами ГПТО, кроме объектов недвижимости, являются утвержденные и зафиксированные на местности границы территориального образования, кадастрового деления, зон с особыми условиями использования территорий, пункты ГГС, ДГС, ГССН. Все структурные элементы ГПТО должны иметь метрическую и атрибутивную информацию, также установленную действующим законодательством<sup>6</sup>.

3 Федеральный закон от 24 июля 2007 г. № 221-ФЗ «О кадастровой деятельности» (ред. от 11 июня 2021 г.) (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 28 октября 2021 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/12154874/?ysclid=mcdo5aniwn49829105> (дата обращения: 15.02.2025).

4 ОК 019-95. Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления (утв. постановлением Госстандарта РФ от 31 июля 1995 г. № 413). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_35362](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_35362) (дата обращения: 12.02.2025).

5 Приказ Минэкономразвития России от 1 марта 2016 г. № 90 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения и помещения». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71274166> (дата обращения: 17.02.2025).

6 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 15 марта 2022 г. № П/0082 «Об установлении формы технического плана, требований к его подготовке и состава содержащихся в нем сведений». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403720102/?ysclid=mcdo5aniwn49829105> (дата обращения: 17.02.2025).



**Рис. 1** Графическое представление структуры геопространства территориального образования

**Fig. 1** Graphical representation of the geospatial structure of a territorial entity

Структура геопространства, в графическом виде представленная на рис. 1, состоит из координатного пространства, зафиксированного исходными пунктами геодезического обоснования (ГО) и структурными элементами (объектами недвижимости с их границами), пространственные параметры которых определены в этом координатном пространстве<sup>7</sup>. При этом отметим важнейший принцип создания геопространства: метрика его структурных элементов должна соответствовать своим реальным размерам на физической поверхности Земли [6].

Поскольку наполнение геопространства структурными элементами происходит поэтапно в течение достаточно большого интервала времени  $\Delta t$ , следующим технологическим аспектом является определение стабильности в координатном пространстве исходных пунктов ГО. Под стабильностью понимается совпадение фактических координат этих пунктов в пределах точности их определения на моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ .

В качестве критерия стабильности пунктов в координатном пространстве территориального образования предлагается принять следующую систему уравнений:

1

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_i^{t_1} - x_i^{t_2}, \\ \Delta y_i &= y_i^{t_1} - y_i^{t_2}, \\ \Delta_{(x,y)_i} &= \sqrt{(x_i^{t_1} - x_i^{t_2})^2 + (y_i^{t_1} - y_i^{t_2})^2} \leq \frac{m_{НОРМ}}{t}, \end{aligned}$$

где  $t$  — коэффициент пренебрегаемого влияния изменения координат пунктов на точность выполнения математической обработки результатов геодезических измерений;

$i$  — текущий номер исходного пункта ГО, анализируемого на стабильность в координатном пространстве территориального образования;

$m_{НОРМ}$  — нормативная СКП определения координат ХТ объектов недвижимости, которая зависит от целевого назначения координатного пространства территориального образования (геодезическое обеспечение градостроительной, землеустроительной и кадастровой деятельности).

Если координатное пространство предназначается только для геодезического обеспечения землеустроительной и кадастровой деятельности, то в качестве  $m_{НОРМ}$  следует принять нормативное значение, определяемое категорией земель, на которой расположены объекты этих работ.

<sup>7</sup> Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 15 марта 2022 г. № П/0082 «Об установлении формы технического плана, требований к его подготовке и состава содержащихся в нем сведений». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403720102/?ysclid=mcdohly7ot25104268> (дата обращения: 17.02.2025).

Потеря стабильности исходных пунктов ГО вызывает деформацию координатного пространства, обуславливая расхождения между местоположением объектов недвижимости, поставленных на государственный кадастровый учет и составляющих геопространство территориального образования на момент времени  $t_1$ , и вновь образуемых объектов недвижимости в момент времени  $t_2$ . Такая ситуация определяет природу возникновения реестровых ошибок, блокируя (затрудняя) постановку на ГКУ новых структурных элементов геопространства.

Контроль стабильности исходных пунктов ГО осуществляется в результате выполнения контрольных геодезических измерений, и в случае невыполнения критерия (1) с использованием соответствующих алгоритмов математической обработки этих измерений координатное пространство территориального образования восстанавливается к моменту времени  $t_1$ . Аналогичная ситуация возникает, когда в силу каких-то причин и обстоятельств выполняется перевычисление координат исходных пунктов ГО, чем обуславливается возникновение нового координатного пространства в момент времени  $t_2$ , а все пространственные данные объектов недвижимости остаются в координатном пространстве на момент времени  $t_1$ .

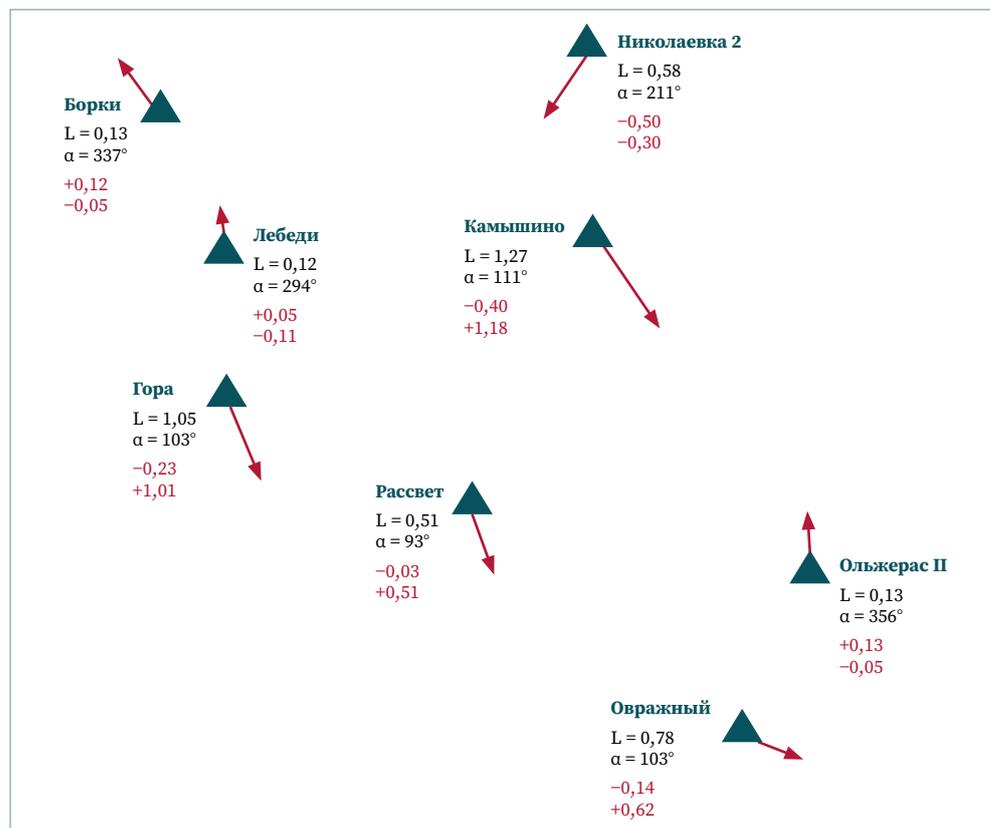
Так, в 2021–2022 годах Росреестр выполнил работы по повышению однородности координат пунктов ГГС в местных системах координат (МСК) для многих регионов Российской Федерации. В результате перевычисления координат исходных пунктов ГО из пространственной прямоугольной ГСК-2011 в МСК Кемеровской области были получены новые значения координат пунктов ГГС на момент времени  $t_2$ , которые значительно расходятся с первоначальными значениями на момент времени  $t_1$ . Отметим, что при этом координаты границ структурных элементов геопространства не перевычислялись.

Следовательно, существующее ГПТО соответствует моменту времени  $t_1$ , а созданное в результате перевычисления координат исходных пунктов ГГС координатное пространство — моменту времени  $t_2$ . Поэтому определение местоположения (координат ХТ) вновь образуемых объектов недвижимости на текущий момент времени не будет соответствовать ГПТО.

Расхождения в координатах, а также векторы смещения пунктов после их перевычисления приведены на рис. 2.

**Рис. 2** Деформация координатного пространства территориального образования, обусловленная перевычислением координат исходных пунктов ГГС в Кемеровской области

**Fig. 2** Deformation of the coordinate space of a territorial entity caused by the recalculation of the coordinates of the GGS starting points in the Kemerovo region



В результате анализа создавшейся ситуации представляется целесообразным введение нового термина — «актуальное геопространство территориального образования». Актуальным ГПТО будет в том случае, когда для координат исходных пунктов ГО, определяющих на местности координатное пространство, будет выполняться статистический критерий (1).

### 3 Результаты и обсуждение

Применение критерия определяется категорией земель, на которых располагается территориальное образование. Например, при расположении в территориальном образовании исходных пунктов ГГС Борки и Лебеди геопространство будет актуальным для всех категорий, кроме земель населенных пунктов. При расположении в территориальном образовании исходных пунктов ГГС Камышино и Гора геопространство будет актуальным только для земель сельскохозяйственного назначения, особо охраняемых территорий, земель лесного и водного фондов, земель запаса.

В целом, анализируя деформацию координатного пространства в Кемеровской области, следует отметить, что для всех населенных пунктов геопространство в соответствии с критерием (1) не является актуальным. Такая ситуация обуславливает природу возникновения реестровых ошибок, блокируя постановку на ГКУ вновь образуемых земельных участков.

### 4 Выводы

Итогом выполненных теоретических и экспериментальных исследований являются следующие основные результаты.

1. Предложена система терминов («территориальное образование», «координатное пространство территориального образования», «актуальное геопространство территориального образования»), которую целесообразно использовать при геодезическом обеспечении кадастровых работ в ситуации возможного изменения координат исходных пунктов ГО.
2. Установлена структура ГПТО, состоящая из координатного пространства, определяемого координатами исходных пунктов ГО и объектами недвижимости, границы которых фиксируются в этом координатном пространстве.
3. Разработан критерий в виде системы уравнений (1), определяющий состояние ГПТО (актуальное или неактуальное), исходя из категории земель, на которых расположены объекты кадастровых работ.
4. На основании разработанного критерия определено состояние координатного пространства после перевычисления координат пунктов ГГС в Кемеровской области и сделано заключение об актуальности геопространства в этом территориальном образовании только для земель водного и лесного фондов, земель запаса и лишь в ряде случаев (при соответствующем расположении исходных пунктов) — для земель других категорий. При этом для земель населенных пунктов, где в большинстве случаев осуществляется кадастровая деятельность, геопространство будет неактуальным.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ключниченко В.Н., Ивчатова Н.С. Особенности формирования кадастра в России // Вестник СГУГиТ. 2020. № 2. С. 198–208. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-198-208.

2. Алакоз В.В. О проблемах геодезического обеспечения кадастра недвижимости и совершенствовании кадастровой деятельности // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2020. Т. 10. № 189. С. 51–58. DOI:10.33920/sel-4-2010-07.
3. Ламерт Д.А., Обиденко В.И., Карпик А.П. Реализация «дорожной карты»: пути повышения качества пространственного описания объектов государственного кадастра недвижимости // Геодезия и картография. 2013. № 12. С. 45–49.
4. Сизов А.П. Опыт использования методов математической статистики при анализе результатов государственного земельного надзора // Геодезия и картография. 2019. Т. 80. № 10. С. 55–64. DOI:10.22389/0016-7126-2019-952-10-55-64.
5. Аврунев Е.И., Горобцов С.Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ: монография. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. 238 с.
6. Карпик А.П., Хорошилов В.С. Сущность геоинформационного пространства территорий как единой основы развития государственного кадастра недвижимости // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2012. № 1. С. 134–136.
7. Карпик А.П. Информационное обеспечение геодезической пространственной информационной системы // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2013. № 4/С. С. 70–73.
8. Карпик А.П., Лисицкий Д.В. Электронное геопространство — сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. 2009. № 5. С. 41–44.
9. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. Новосибирск: СГГА, 2004. 259 с.

**АВТОРЫ****Аврунев Евгений Ильич**

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

кафедра кадастра и территориального планирования,  
Институт кадастра и природопользования

канд. техн. наук, доцент

 0000-0003-3172-5330

**Артемов Алексей Владимирович**

 artemov.83@mail.ru

Кемеровский областной кадастровый центр, Кемерово, Россия

 0009-0007-4311-5237

Поступила 27.03.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# On the term “actual geospace of territorial entities”

**Evgeny I. Avrunev<sup>1</sup>**✉, **Alexey V. Artemov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Kemerovo Regional Cadastral Center Limited Liability Company, Kemerovo, Russia

✉ avrunev-ei@yandex.ru

**CITATION** Avrunev EI, Artemov AV. On the term “actual geospace of territorial entities”. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 151–159. DOI:10.30533/GiA-2025-033.

**KEYWORDS** geospace, structure, structural elements, coordinate space, territorial formation, relevance, boundaries of real estate and land management, land category, Unified State Register of Real Estate

**ABSTRACT** The article discusses in detail the conceptual apparatus currently used in the coordination support of cadastral works, which are carried out to fill the Unified State Register of Real Estate with up-to-date and reliable information about real estate objects located in the corresponding territory. A conceptual apparatus is proposed, due to the problem situation that arose as a result of the recalculation of the coordinates of state geodetic network points by Rosreestr in 2022 into a local coordinate system in a number of regions of the Russian Federation, including in the Kemerovo region. The introduction of the following new terms is proposed and justified from a legal point of view: “territorial formation”, “coordinate space of territorial formation”, “deformation of coordinate space”, “geospace of territorial formation”, “actual geospace of territorial formation”. At the same time, the compatibility of the proposed conceptual apparatus with existing regulatory documents defining the requirements for the implementation of cadastral work in the territory of the Russian Federation is considered. The structure of the geospace of territorial formation is determined in which elements (points of state geodetic networks) forming the coordinate space are distinguished. In relation to these elements, a statistical criterion has been proposed that makes it possible to determine whether the geospace of the corresponding territorial formation is relevant or not. Based on the developed mathematical algorithm and relevant production materials, it was established that the geospace of the Kemerovo region is not relevant.

**REFERENCES** 1. Klyushnichenko VN, Ivchatova NS. Osobennosti formirovaniya kadastra v Rossii [Features of creating a cadastre in Russia]. *Vestnik SSUGT*. 2020;2: 198–208. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-198-208.

2. Alakoz VV. O problemah geodezicheskogo obespechenija kadastra nedvizhimosti i sovershenstvovanii kadastrovoj dejatel'nosti [On the problems of geodetic support of the real estate cadastre and improvement of cadastral activities]. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*. 2020;10(189): 51–58. (In Russian). DOI:10.33920/sel-4-2010-07.
3. Lamert DA, Obidenko VI, Karpik AP. Realizaciya “dorozhnoj karty”: puti povysheniya kachestva prostranstvennogo opisaniya ob’ektov gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti [Realization of “Road map”: ways to rise quality of spatial description of objects of State cadastre of real estate]. *Geodesy and Cartography*. 2013;12: 45–49. (In Russian).
4. Sizov AP. Opyt ispol'zovaniya metodov matematicheskoy statistiki pri analize rezul'tatov gosudarstvennogo zemel'nogo nadzora [Experience in using mathematical statistics methods in analyzing the results of state land supervision]. *Geodesy and Cartography*. 2019;10(80): 55–64. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-952-10-55-64.
5. Avrunev EI, Gorobtsov SR. *Geodezicheskoe obespechenie kadastrykh rabot* [Geodetic support of cadastral works] [monograph]. Novosibirsk: Publishing house of SSUGT; 2021. 212 p. (In Russian).
6. Karpik AP, Horoshilov VS. Sushchnost' geoinformacionnogo prostranstva territorij kak edinoj osnovy razvitiya gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti [The essence of the geographic information space of territories as a single basis for the development of the state cadastre of real estate]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2012;1: 134–136. (In Russian).
7. Karpik AP. Informacionnoe obespechenie geodezicheskoy prostranstvennoj informacionnoj sistemy [Information support of the geodetic spatial information system]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2013;4/S: 70–73. (In Russian).
8. Karpik AP, Lisickij DV. Elektronnoe geoprostanstvo – sushchnost' i konceptual'nye osnovy [Electronic geospace – essence and conceptual framework]. *Geodesy and Cartography*. 2009;5: 41–44. (In Russian).
9. Karpik AP. *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformacionnogo obespecheniya territorij* [Methodological and technological bases of geoinformation support of territories] [monograph]. Novosibirsk: SSGA; 2004. 259 p. (In Russian).

**AUTHORS Evgeny I. Avrunev**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 Department of Cadastre and Territorial Planning,  
 Institute of Cadastre and Nature Management  
 PhD in Engineering, Associate Professor  
 0000-0003-3172-5330

**Alexey V. Artemov**

 artemov.83@mail.ru  
 Kemerovo Regional Cadastral Center Limited Liability Company, Kemerovo, Russia  
 0009-0007-4311-5237

Submitted: March 27, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Анализ нарушений вида разрешенного использования земельного участка по космическим снимкам и перспективы автоматизации данного процесса

С.С. Новиков<sup>1</sup>✉, Т.В. Илюшина<sup>2</sup>, П.Е. Новикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
✉ s.novikov92@inbox.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Новиков С.С., Илюшина Т.В., Новикова П.Е. Анализ нарушений вида разрешенного использования земельного участка по космическим снимкам и перспективы автоматизации данного процесса // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 160–174. DOI:10.30533/GiA-2025-038.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** вид разрешенного использования земельного участка, государственный земельный надзор, дистанционное зондирование Земли, земельный участок, земли лесного фонда, «Канопус-В», космический снимок, муниципальный земельный контроль, нарушения использования земли

**АННОТАЦИЯ** Государственный земельный надзор и муниципальный земельный контроль на землях лесного фонда в Российской Федерации имеют свои особенности. Организация поиска нарушений использования лесных участков связана со значительной удаленностью земель лесного фонда от населенных пунктов, что усложняется отсутствием определенных границ у большого количества лесных участков. Следует также учесть, что обработать вручную большой объем полученных данных будет проблематично, а тем более делать это на регулярной, системной основе. Проблемы поиска нарушений могут быть решены с помощью применения данных, полученных с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и посредством системы автоматизации. В связи с этим в данной работе рассмотрены возможности для автоматизации процесса поиска нарушений на земельных участках, отнесенных к лесному фонду. Изучена законодательная база, проанализированы проблемы, которые могут возникнуть при построении системы автоматизации поиска нарушений, проведены эксперименты по автоматизации процессов. Даны рекомендации по необходимости изменения текущего законодательства для сокращения количества лесных участков без определенных границ в целях автоматического

установления нарушений режима использования. Рассмотрена возможность построения сервиса поиска нарушений на лесных участках и установления времени возможного возникновения нарушений режима использования на основании снимков, полученных с космических аппаратов типа «Канопус-В», а также возможность интеграции перспективных космических аппаратов для улучшения качества работы системы.

## 1 Введение

Одно из важных направлений государственного земельного надзора и муниципального земельного контроля — это поиск нарушений использования земельных участков (ЗУ), который на отдаленных от поселений ЗУ, очевидно, затруднен. Наиболее проблематичным будет поиск нарушений использования ЗУ для земель лесного фонда. Поскольку территория Российской Федерации на 65 % состоит из земель лесного фонда, проблема становится еще более острой. Ситуацию в целом могло бы облегчить использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), однако в силу величины территории проанализировать эти снимки вручную затруднительно. Необходимо внедрить анализ снимков не только для разового использования, а на регулярной, системной основе в определенное время года. Именно в данном аспекте очень перспективной выглядит возможность применения машинного зрения для анализа снимка ДЗЗ и поиска нарушений использования ЗУ лесного фонда.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Виды разрешенного использования земель в РФ

При осуществлении контроля за надлежащим использованием ЗУ регламентированы принципы и действия, совершаемые с землей. Согласно статье 37 Градостроительного кодекса Российской Федерации (ГрК РФ)<sup>1</sup>, определены следующие виды использования ЗУ: основные виды разрешенного использования, условно разрешенные виды использования и вспомогательные виды разрешенного использования. При анализе нормативно-справочной документации сделан упор на рассмотрение основных видов разрешенного использования ЗУ согласно классификатору видов разрешенного использования земельных участков (далее — классификатор), утвержденному Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр)<sup>2</sup>.

В отношении ЗУ в соответствии с статьей 37 ГрК РФ может быть установлен один либо несколько основных условно разрешенных или вспомогательных видов разрешенного использования. Правообладателю ЗУ по правилам, предусмотренным Росреестром согласно Земельному кодексу Российской Федерации (ЗК РФ), предоставлено право самостоятельно выбирать вид разрешенного использования (рис. 1).

1 Градостроительный кодекс РФ от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/12138258> (дата обращения: 01.08.2024).

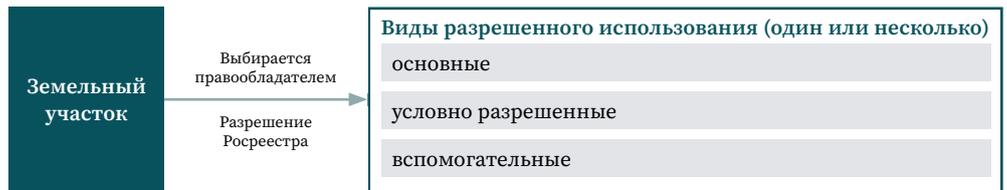
2 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 10 ноября 2020 г. № П/0412 «Об утверждении классификатора видов разрешенного использования земельных участков» (с изменениями и дополнениями от 23 июня 2022 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/75062082> (дата обращения: 01.08.2024).

**Рис. 1** ➔

Схема присвоения вида разрешенного использования земельного участка

**Fig. 1**

Scheme of assigning the permitted land use type to a land plot



Виды разрешенного использования ЗУ определяются в соответствии с классификатором, утвержденным федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере земельных отношений.

## 2.2 Примеры определения нарушений использования ЗУ по снимкам ДЗЗ

### 2.2.1 Определение нарушений использования ЗУ по снимкам с космических аппаратов типа «Канопус-В» на примере земель лесного фонда

При проведении исследования в целях применения снимков отечественной группировки космических аппаратов (КА) в государственном земельном надзоре и муниципальном земельном контроле в части определения нарушения разрешенного использования ЗУ, которые относятся к землям лесного фонда, по классификатору необходимо обратить внимание на виды участков согласно строкам 10.0–10.4.

Одним из наиболее легко обнаруживаемых нарушений при использовании земель лесного фонда является незаконная рубка лесных насаждений. Авторами для исследования выбраны, согласно классификатору, виды разрешенного использования «Использование лесов» (10.0), «Заготовка древесины» (10.1), «Лесные плантации» (10.2), «Заготовка лесных ресурсов» (10.3), «Резервные леса» (10.4) (табл. 1<sup>3</sup>).

**Таблица 1** ➔

Выбранное для исследования описание вида разрешенного использования ЗУ

**Table 1**

Description of the type of permitted use of the land plot (selected for the study)

Использование лесов	Деятельность по заготовке, первичной обработке и вывозу древесины и недревесных лесных ресурсов, охрана и восстановление лесов и иные цели. Содержание данного вида разрешенного использования включает в себя содержание видов разрешенного использования с кодами 10.1–10.4	10.0
Заготовка древесины	Рубка лесных насаждений, выросших в природных условиях, в том числе гражданами для собственных нужд, частичная переработка, хранение и вывоз древесины, создание лесных дорог, размещение сооружений, необходимых для обработки и хранения древесины (лесных складов, лесопилен), охрана и восстановление лесов	10.1
Лесные плантации	Выращивание и рубка лесных насаждений, выращенных трудом человека, частичная переработка, хранение и вывоз древесины, создание дорог, размещение сооружений, необходимых для обработки и хранения древесины (лесных складов, лесопилен), охрана лесов	10.2
Заготовка лесных ресурсов	Заготовка живицы, сбор недревесных лесных ресурсов, в том числе гражданами для собственных нужд, заготовка пищевых лесных ресурсов и дикорастущих растений, хранение, неглубокая переработка и вывоз добытых лесных ресурсов, размещение временных сооружений, необходимых для хранения и неглубокой переработки лесных ресурсов (сушилки, грибоварни, склады), охрана лесов	10.3
Резервные леса	Деятельность, связанная с охраной лесов	10.4

<sup>3</sup> Классификатор видов разрешенного использования земельных участков. Приложение к приказу Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 10 ноября 2020 г. № П/0412. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/75062082/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/?ysclid=mcj8gumvcp314150325> (дата обращения: 01.08.2024).

**Рис. 2** 

Пример рубок леса на снимке с КА «Канопус-В»

**Fig. 2**

Example of forest felling detection on an image from the Kanopus-V satellite

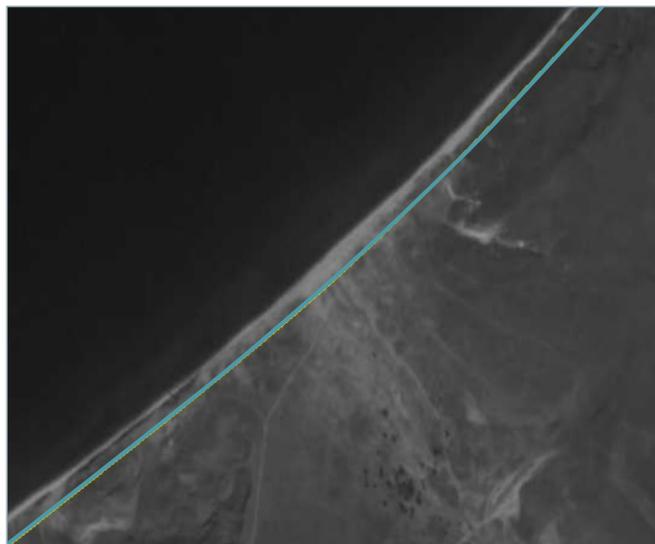


**Рис. 3** 

Пример определения границы водоохранной зоны

**Fig. 3**

Example of defining a boundary of a water protection zone



В ходе экспериментальной части исследования был выбран снимок ДЗЗ с КА типа «Канопус-В» для рассмотрения ситуации с поиском нарушения использования ЗУ<sup>4</sup>. На снимке в явном виде прослеживается зона вырубki леса, которая может являться нарушением (рис. 2). Предположительно участку был присвоен классификатор 10.3 – «Заготовка лесных ресурсов». При этом, анализируя снимок ДЗЗ, можно отметить сплошную рубку деревьев, что будет являться нарушением установленного целевого назначения ЗУ<sup>5</sup>. Использование земли не по целевому назначению влечет за собой административное нарушение в части охраны окружающей среды и природопользования<sup>6</sup>.

### 2.2.2 Определение нарушений использования ЗУ по снимкам с космических аппаратов типа «Канопус-В» на примере водоохранной зоны

Как показало исследование, на снимках ДЗЗ (рис. 3) можно четко проследить водоохранную зону [1]. Ее ширина устанавливается от истока для рек или ручьев протяженностью:

- 1) до 10 км – в размере 50 м;
- 2) от 10 до 50 км – в размере 100 м;
- 3) от 50 км и более – в размере 200 м.

Для реки, ручья протяженностью менее 10 км от истока до устья водоохранная зона совпадает с прибрежной защитной полосой. Радиус водоохранной зоны для истоков реки, ручья устанавливается в размере 50 м.

Ширина водоохранной зоны озера, водохранилища, за исключением озера, расположенного внутри болота, или озера, водохранилища с акваторией менее 0,5 кв. км, устанавливается в размере 50 м. Ширина водоохранной зоны водохранилища, расположенного на водотоке, устанавливается равной ширине водоохранной зоны этого водотока<sup>7</sup>.

В рамках исследования сделано предположение, что данный участок является рекой или ручьем с первой градацией размера водоохранной зоны, тогда при использовании снимка с КА «Канопус-В» с панхроматическим разрешением 2,1 м водоохранная зона составит ~24 пикселя, что позволяет даже при минимальном размере данных зон успешно искать нарушения на снимках [2].

4 Шолле Ф. Глубокое обучение на Python / пер. с англ. 2-е изд. СПб.: Питер, 2023. 576 с.

5 Юн Цуй. Рецепты Python. Коллекция лучших техник программирования. СПб.: Питер, 2024. 512 с.

6 Кодекс РФ об административных правонарушениях. Статья 8.8. Использование земельных участков не по целевому назначению, невыполнение обязанностей по приведению земель в состояние, пригодное для использования по целевому назначению. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34661/54179b602a94ee33b01318897e0f050dc25d73cf](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/54179b602a94ee33b01318897e0f050dc25d73cf) (дата обращения: 01.08.2024).

7 Водный кодекс РФ. Статья 65. Водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683/4c65ff0f232195d8dcc08535d2c3923d5b67f1c/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/4c65ff0f232195d8dcc08535d2c3923d5b67f1c/) (дата обращения: 01.08.2024).

### 2.2.3 Определение нарушений использования ЗУ по снимкам с космического аппарата типа «Канопус-В» на примере неустановленных границ ЗУ

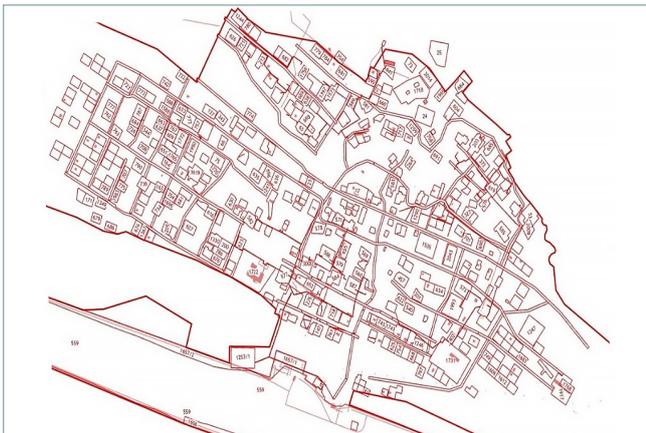
Однако на больших территориях (более нескольких десятков километров, где возникает сложность использования даже беспилотного летательного аппарата гражданского класса) существует проблема своевременной обработки информации, поступающей от группировки КА ДЗЗ: количество данных огромно, при этом они должны быть оперативно обработаны и соотнесены с зарегистрированными ЗУ в соответствии с классификатором.

Существенно усложняет работу и то обстоятельство, что значительное количество участков до сих пор не имеет установленных границ. В России, по данным Росреестра, по состоянию на 2021 год не были определены границы более 23 млн ЗУ. В связи с этим параллельно с разработкой моделей важно устранить данную проблему и автоматизировать интеграцию новых данных по состоянию участков. Отсутствие межевания на ЗУ может привести к несоответствию границ и построек, принадлежащих одному участку, фактически построенных на другой территории.

В качестве примера можно рассмотреть кадастровый квартал 14:34:030001 (рис. 4<sup>8</sup>) и его окрестности (рис. 5<sup>8</sup>). Как видно из данных, полученных с помощью сервиса «Публичная кадастровая карта», объекты недвижимости на данной территории зарегистрированы надлежащим образом лишь частично, что будет серьезно осложнять работу федеральных служб.

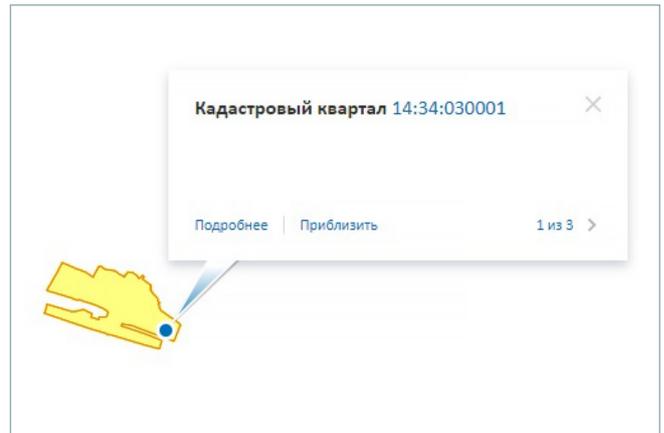
**Рис. 4**   
Квартал 14:34:030001

**Fig. 4**  
Cadastral block 14:34:030001



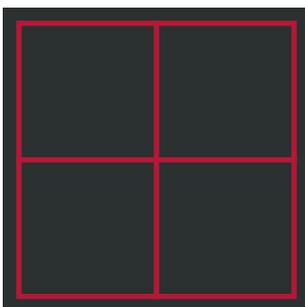
**Рис. 5**   
Окрестности квартала 14:34:030001

**Fig. 5**  
Surrounding area of the cadastral block 14:34:030001



**Рис. 6**   
Пример упрощенного участка

**Fig. 6**  
Example of a simplified land plot



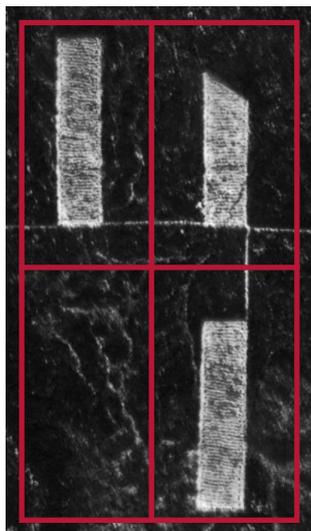
Исходя из большого количества участков с неопределенными границами, необходимо автоматизировать процесс их обработки. В рамках подготовки данной работы было организовано постепенное машинное обучение модели, начавшееся с упрощенной эмуляции для отработки базовых идей и снижения требований к вычислительным мощностям [3]. Для этого была построена эмуляция космических снимков с условным делением границ под рубку леса (рис. 6), чтобы потом перейти к пробному распознаванию рубки леса по панхроматическому (черно-белое) изображению (рис. 7), а позже — к комплексированному (совмещение черно-белого изображения с точностью 1 м с RGB с точностью 2 м) изображению.

В целях дальнейшего обучения модели автоматического обнаружения и классификации объектов на снимках ДЗЗ (далее — модель детекции) в базу данных (БД) для тестового режима были внесены [4, 5]:

8 Публичная кадастровая карта / Росреестр. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://roscadaster.com/map> (дата обращения: 15.05.2024).

**Рис. 7**   
Снимок с КА «Канопус-В»

**Fig. 7**  
Kanus-V satellite image



- 1) общие характеристики ЗУ:
  - координаты;
  - кадастровый номер;
- 2) информация о зарегистрированных правах:
  - правообладатель ЗУ;
  - вид разрешенного использования ЗУ.

От хранения изображений в БД пришлось отказаться, так как это стремительно наполнило бы БД и из-за огромного количества информации сделало обработку чересчур длительным процессом, практически необработываемым. Эти данные позволят работать с ЗУ с целью установления нарушения режима использования.

- Структуру базы данных составляют:
- ID;
  - координаты характерных точек участка;
  - кадастровый номер участка;
  - правообладатель участка;
  - вид разрешенного использования.

### 2.2.4 поэтапное обучение модели детекции данных

Для начала необходимо провести ряд действий, направленных на создание и обучение модели.

#### Шаг 1. Обучение модели

На входе модели — изображения, на которых мы тренируем, на выходе — D-мерный эмбединг. Эмбединг (*англ.* embedding) — это вектор, представленный в виде массива чисел, который получается в результате преобразования данных.

#### Шаг 2. Индексирование базы изображений

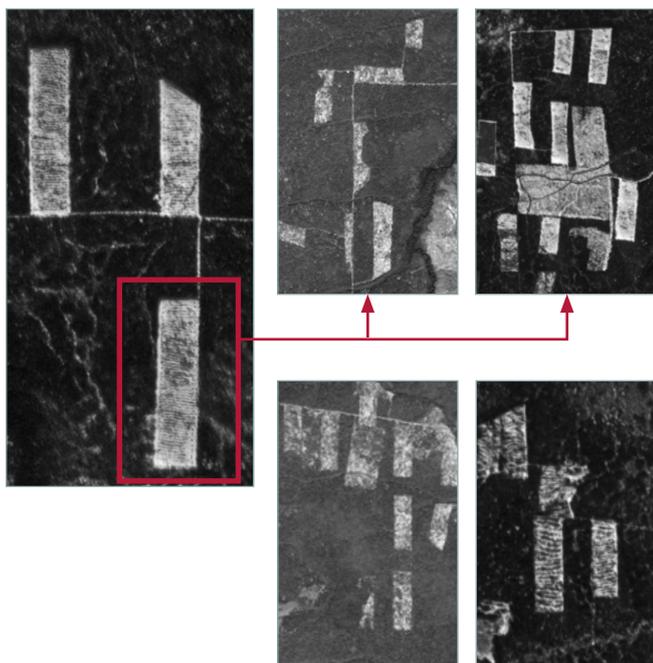
Индексирование представляет из себя многократный просмотр обученной модели на всех изображениях и запись эмбедингов в специальный индекс для быстрого поиска. Теперь можно перейти непосредственно к поиску.

#### Шаг 3. Поиск

По загруженному пользователем изображению осуществляется прогон модели, получение эмбединга и сравнение его данных с остальными в базе. Результатом поиска является отсортированная по релевантности выдача.

**Рис. 8**   
Возможные ошибки при обучении модели детекции данных

**Fig. 8**  
Possible errors in training a data detection model



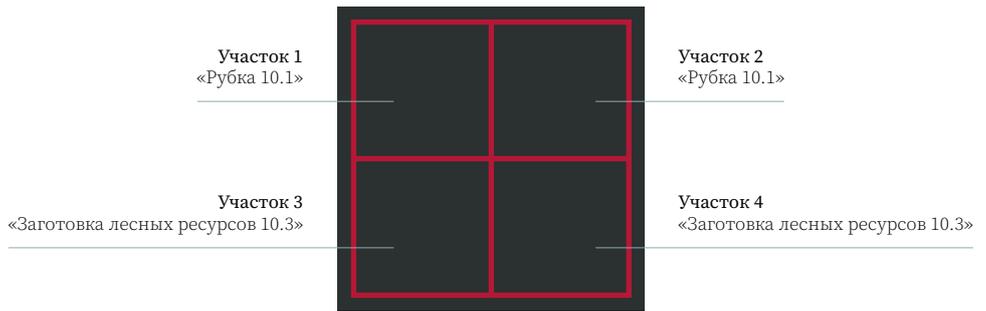
### 2.2.5 Возможные ошибки при обучении модели детекции данных

Необходимо набрать самые распространенные исключения при работе поиска и включить их обработку в алгоритм. Поскольку данная модель максимально упрощена, ошибок в поиске она не дает, однако уже на панхроматическом изображении ситуация в корне меняется. В дальнейшем при переходе к комплексированному изображению исключений станет только больше. Необходимо также предусмотреть фильтрацию входящих данных — на начальном этапе придется отказаться от снимков ДЗЗ в зимний период, а в дальнейшем, возможно, придется сделать две модели для летних и зимних снимков ДЗЗ (рис. 8).

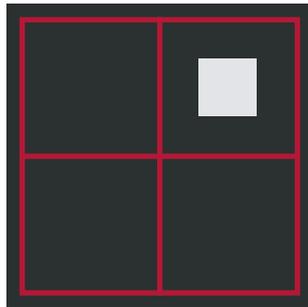
#### Пример использованного участка

Рассмотрим тестовые участки (рис. 9). Участки 1 и 2 — допустимое использование «Рубка» (10.1). Участки 3 и 4 — допустимое использование «Заготовка лесных ресурсов» (10.3).

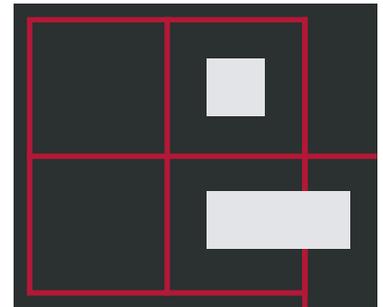
**Рис. 9**   
 Пример использования участка  
**Fig. 9**  
 Example of land plot usage



**Рис. 10**   
 Пример определения рубок на участке  
**Fig. 10**  
 Example of felling definition in an area



**Рис. 11**   
 Пример определения рубок на участках и участках, смежных с данными  
**Fig. 11**  
 Example of detecting felling areas on land plots and adjacent plots

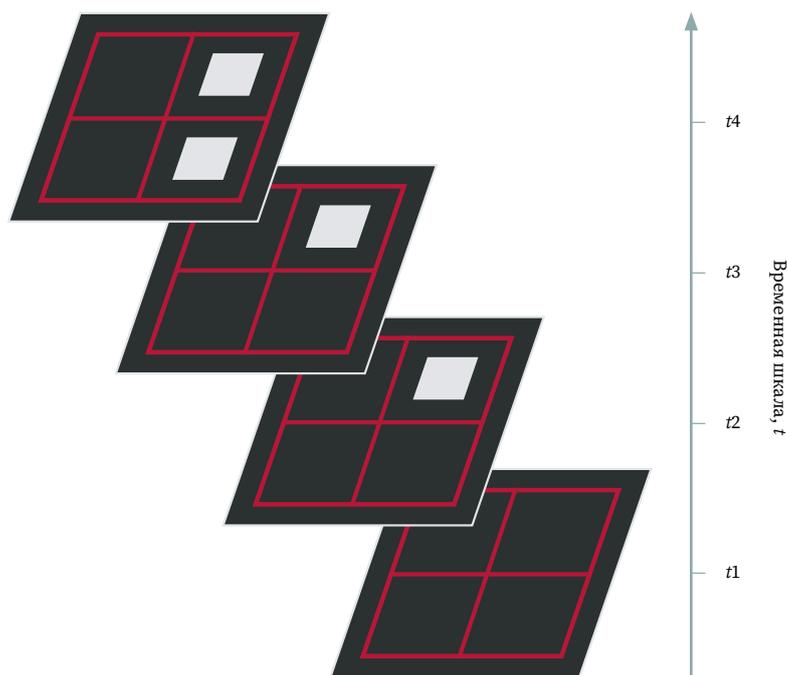


На начальном этапе модель была обучена на поиск эмуляции «рубки», которая в данном случае обозначает белый квадрат (рис. 10, 11).

Далее было сделано предположение, что нарушение может не ограничиваться рамками одного участка, поэтому диапазон поиска координат был расширен, а модель сообщила, на каких участках еще продолжается данное нарушение.

Затем было сделано предположение, что модель бы могла определять предполагаемый момент возникновения нарушения, проверяя несколько снимков участка на протяжении времени. Так можно вычислить конкретного собственника, который допустил нарушение режима использования участка. Как видно, нарушение на участке 4 возникло в момент времени  $t_4$  (рис. 12), и прошлые владельцы его эксплуатировали, соблюдая правила, а на участке 2 нет нарушений, так как он имеет разрешенное использование по классификатору «Рубка» (10.1).

**Рис. 12**   
 Пример определения рубок на участках в течение промежутка времени и смежных участков  
**Fig. 12**  
 Example of detecting felling on land plots over a time period, including adjacent parcels

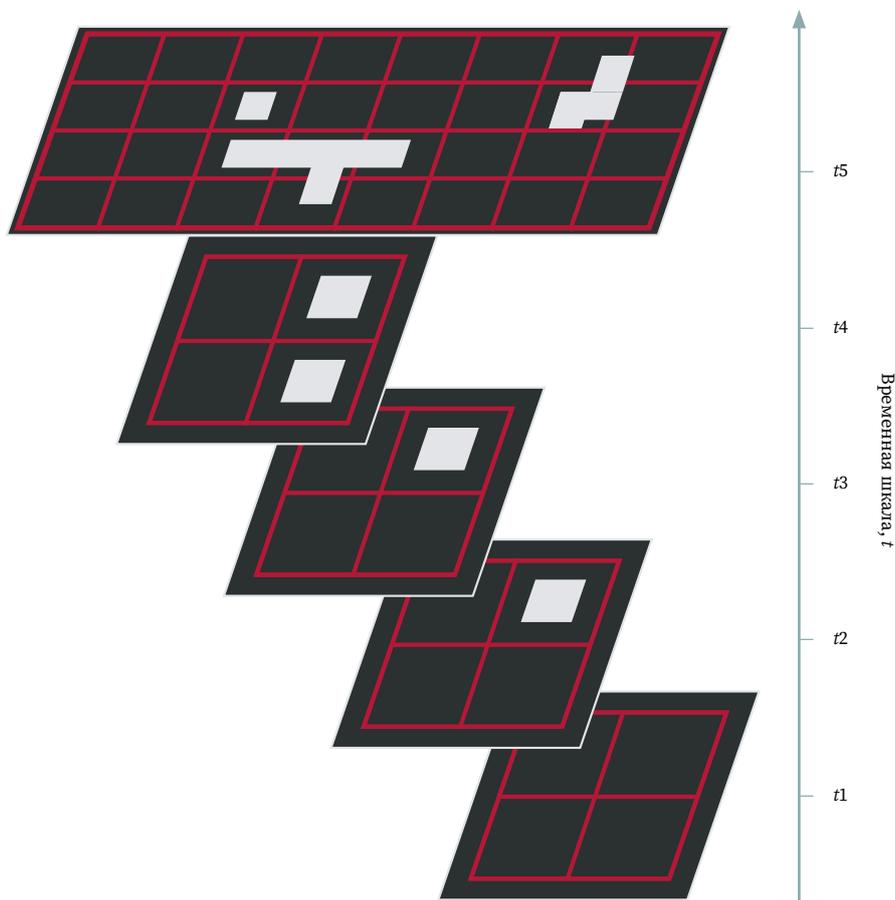


### 3 Результаты

Исходя из двух прошлых решений, более продуктивно было бы рассматривать комплексные изменения участка во времени и его взаимодействие с соседними участками. Так, найденное нарушение может быстро, а главное в автоматическом режиме, указать на другие участки с нарушением вида разрешенного использования (рис. 13).

**Рис. 13** ➔  
Пример определения рубок на участках в течение промежутка времени и нескольких смежных участков

**Fig. 13**  
Example of detecting felling on land plots over a time period and several adjacent plots

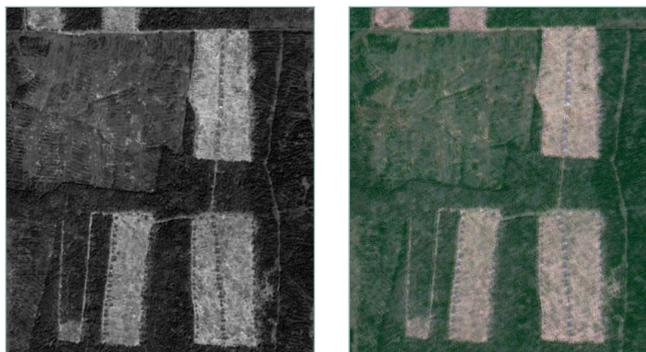


#### 3.1 Переход к обучению модели на комплексированных снимках

Далее перед нами стоит задача перейти от эмулированных данных к их применению на практике. Для начала необходимо вывести универсальные паттерны рубок, чья выдача будет релевантна и применима к остальным участкам. Затем можно будет перейти к расширению поиска видов нарушений, например незаконных построек, а впоследствии даже с указанием типа данных строений (рис. 14).

**Рис. 14** ➔  
Переход к обучению модели на комплексированных снимках

**Fig. 14**  
Transition to training the model on complex images





### 3.2 Пример ошибочных результатов работы обученной модели

Одной из главных проблем обученной модели может стать ложно положительное срабатывание. Например, обученная модель, используемая для автомобильных автопилотов, ошибочно может срабатывать на фальшивые нарисованные знаки вместо официально установленных.

Однако на текущий момент полностью отказаться от участия человека в процессе принятия решений о наличии нарушений не удастся. Метод машинного обучения для распознавания ЗУ по снимкам, полученным с КА типа «Канопус-В», уже нашел применение в отдельных проектах. Белорусские исследователи А.А. Золотой, Д.И. Новиков осенью 2024 года представили интересный вариант использования нейросетей [6]. Авторы использовали снимки с КА типа «Канопус-В» для получения информации о наличии на снимках лесных и пахотных земель. Данная работа показала наличие перспектив для применения снимков ДЗЗ в сочетании с машинным обучением. Впоследствии с развитием взаимодействия машинного зрения с БД зарегистрированных ЗУ и сокращением количества участков без определенных границ появится реальная возможность оперативно выявлять нарушения использования ЗУ [7–10].

Реализовав поправки в действующие нормативные документы в части требований к размеру проекции пикселя на местности для ЗУ лесного фонда (приказ Росреестра от 23 октября 2020 г. № П/0393), можно приступить к реализации ряда систем, которые при должной автоматизации позволят сильно изменить текущую систему кадастрового учета и мониторинга земель с помощью систем ДЗЗ [11].

Прототип системы поиска нарушений использования ЗУ может быть реализован достаточно быстро при выделении необходимых технических ресурсов. Общая концепция данного сервиса была представлена нами на XX Международном форуме «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в 2024 году. Параллельно с уменьшением количества ЗУ с неопределенными границами эффективность предлагаемой разработанной системы будет повышаться, а в дальнейшем с помощью интеграции перспективных КА ДЗЗ и снижения времени обновления данных ДЗЗ спроектированная система сможет работать практически в реальном времени. Концептуальная блок-схема приведена на рис. 15.

**Рис. 15** ◀  
Схема работы сервиса поиска нарушений использования ЗУ по снимкам ДЗЗ

**Fig. 15**  
Scheme of operation of the service for searching violations of land use based on remote sensing images

## 4 Обсуждение

В дальнейшем планируется создание моделей, способных работать с комплексированными изображениями по различным видам нарушений для различных видов разрешенного использования. Эксперимент будет продолжен на ЗУ категории земель особо охраняемых территорий и объектов и ЗУ, отнесенных к землям сельскохозяйственного назначения (за исключением ЗУ сельскохозяйственного назначения и предоставленных для ведения личного подсобного хозяйства, огородничества, садоводства, индивидуального гаражного или индивидуального жилищного строительства, которые, согласно приказу Росреестра от 23 октября 2020 года № П/0393, имеют более жесткие требования к СКО определения координат характерных точек на снимках ДЗЗ и размеру проекции пикселя на местности).

По результатам проведенного исследования были сформулированы следующие проблемы:

1. В части технических требований необходимы огромные вычислительные мощности для хранения и регулярного анализа снимков ДЗЗ с целью поиска нарушений.
2. Организационные проблемы заключаются в том, что огромное количество ЗУ не имеют определенных границ, следовательно, нарушения, найденные на определенных территориях, нельзя будет быстро соотнести с конкретным нарушителем.
3. Требования к размеру проекции пикселя на снимке, перечисленные в приказе Росреестра от 23 октября 2020 года № П/0393, не могут быть удовлетворены КА отечественных группировок спутников, поэтому целесообразно рассмотреть вопрос снижения требований к размеру проекции пикселя на местности для ЗУ лесного фонда, водного фонда и земель запаса с 60 до 250 см.
4. Необходимо автоматизировать передачу информации о новых зарегистрированных участках и изменениях их границ.
5. Следует интегрировать возможность заказать досъемку участка с КА в процессе совершения регистрационных действий для своевременных проверок при смене собственника (помимо плановых проверок).
6. Впоследствии возможно создание системы, которая будет регулярно отслеживать состояние ЗУ и уведомлять о нем заинтересованных лиц и организации.
7. Постепенный переход от автоматизированного к автоматическому процессу крайне востребован, однако перспектива полного отсутствия контроля со стороны операторов весьма отдаленная.

Один из аспектов исследования, затронутый в работе (общая концепция автоматизации поиска нарушений использования ЗУ по снимкам ДЗЗ с помощью нейросетей), был представлен на XX Международном форуме «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» весной 2024 года.

## 5 Выводы

Несмотря на большие перспективы, которые открывает применение систем машинного обучения для автоматизации поиска нарушений использования ЗУ, перед нами стоит ряд препятствий. Самое существенное — это большое количество участков без определенных границ, что значительно снижает возможности разработанной системы. Для уменьшения количества подобных участков предлагается, во-первых, снизить требования к проекции пикселя на местности для земель лесного фонда, земель водного фонда и земель запаса; во-вторых, использовать впоследствии данные ДДЗ перспективных на настоящий момент КА. Это позволит увеличить объем получаемых данных ДЗЗ, а также снизить нагрузку на государственные органы при их работе с геопространственной информацией.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Тен А.С., Шестаков Н.В., Сорокин А.А. и др. Применение методов машинного обучения для поиска ковулканических ионосферных возмущений по данным ГНСС-наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 37–54. DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-1-37-54.
2. Дубровин К.Н., Фролов А.Н., Батяев Д.А. и др. Использование методов дистанционного зондирования Земли и машинного обучения для мониторинга пахотных земель Дальнего Востока // Сборник материалов XX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. Т. 4. № 1. С. 20–25. DOI:10.33764/2618-981X-2024-4-1-20-25.
3. Гарафутдинова Л.В., Каличкин В.К., Федоров Д.С. Объектно-ориентированная классификация изображений дистанционного зондирования земли с использованием машинного обучения // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2024. № 2. С. 37–47. DOI:10.31677/2072-6724-2024-71-2-37-47.
4. Данилов А.С., Сердюкова Е.А. Автоматизированное обнаружение пластика в акваториях с использованием данных дистанционного зондирования и машинного обучения // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции (Казань, 10–11 апреля 2024 г.). Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2024. С. 779–782.
5. Ерошенко С.А., Матренин П.В., Хальясмаа А.И., и др. Технология обработки данных для прогнозирования притока воды в водохранилище при использовании дистанционного зондирования Земли и сети метеорологических и гидрологических постов // Проблемы региональной энергетики. 2022. № 4. С. 99–109. DOI:10.52254/1857-0070.2022.4-56.09.
6. Золотой А.А., Новиков Д.И. Функция потерь при обучении моделей детектирования лесных и пахотных земель на аэрофотоснимках // Материалы Двенадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: Корпорация «ВНИИЭМ», 2024. С. 114–117.
7. Корихин Н.Н., Ковязин В.Ф. Необходимость применения искусственного интеллекта для обработки данных дистанционного зондирования Земли // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023. № 64. С. 61–66.
8. Сарафанов М.И., Казаков Э.Э., Никитин Н.О. и др. Применение методов машинного обучения для заполнения пропусков в данных дистанционного зондирования на основе пространственных взаимосвязей // Всероссийская научная конференция с международным участием к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. СПб., 2020. С. 87–91.
9. Подольская Е.С. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. С. 1–21. DOI:10.31509/2658-607x-202252-115.
10. Павлова А.И. Применение методов машинного обучения для агроэкологической группировки сельскохозяйственных земель // Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО23): материалы VIII Международной конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2023. С. 162–166. DOI:10.53980/9785907599970\_162.
11. Рогачев С.А. Анализ данных дистанционного зондирования Земли с использованием методов машинного обучения // Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски: сборник докладов Международной научной конференции (Санкт-Петербург, 17 октября 2024 г.). СПб.: ГУАП, 2024. С. 309–311.

АВТОРЫ **Новиков Сергей Сергеевич**

Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Москва, Россия

 0000-0002-4927-4542

**Илюшина Татьяна Владимировна**

✉ tilyushina@yandex.ru

Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
кафедра землеустройства и кадастров, факультет управления территориями  
д-р геогр. наук, доцент

🆔 0009-0008-7114-7479

**Новикова Полина Евгеньевна**

✉ p.novikova93@mail.ru

Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Москва, Россия

🆔 0000-0001-8474-440X

Поступила 04.04.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Analysis of violations of the type of permitted land plot use based on space images and prospects for automation of this process

Sergey S. Novikov<sup>1</sup>✉, Tatiana V. Ilyushina<sup>2</sup>, Polina E. Novikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

✉ s.novikov92@inbox.ru

**CITATION** Novikov SS, Ilyushina TV, Novikova PE. Analysis of violations of the type of permitted land plot use based on space images and prospects for automation of this process. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 160–174. DOI:10.30533/GiA-2025-038.

**KEYWORDS** type of permitted use of land plot, state land supervision, remote sensing of the Earth, land plot, forest fund lands, Kanopus-V, space image, municipal land control, land use violations

**ABSTRACT** State land supervision and municipal land control on forest lands in the Russian Federation have their own peculiarities. The organization of the search for violations of forest land use is associated with the significant remoteness of forest lands from settlements, which is complicated by the lack of defined boundaries of a large number of forest areas. It should also be taken into account that it would be problematic to review the large amount of data received manually, much less to do so on a regular systematic basis. The problems of searching for violations could be solved by applying data obtained from remote sensing spacecrafts and through automation. In this regard, this paper considers the possibilities for automating the process of searching for violations on land plots classified as forestry. The legislative base has been studied, the problems that may arise in the construction of the system of automation of the search for violations have been analyzed, and experiments on the automation of processes have been conducted. Recommendations on the necessity to change the current legislation to reduce the number of forest areas without defined boundaries in order to determine violations of the use regime in automatic mode are given. The possibility of building a service for searching violations in forest areas and establishing the time of possible occurrence of use regime violations on the basis of images obtained from spacecrafts such as “Kanopus-V”, as well as the possibility of integrating promising spacecrafts to improve the quality of the system is considered.

## REFERENCES

1. Ten AS, Shestakov NV, Sorokin AA, et al. Primenenie metodov mashinnogo obuchenija dlja poiska kovulkanicheskikh ionosfernnyh vozmushhenij po dannym GNSS nabljudenij [Application of machine learning methods for detection of covolcanic ionospheric disturbances by GNSS observations data]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2023;20(1): 37–54. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-1-37-54.
2. Dubrovin KN, Frolov AN, Batjaev DA, et al. Ispol'zovanie metodov distancionnogo zondirovanija Zemli i mashinnogo obuchenija dlja monitoringa pahotnyh zemel' Dal'nego Vostoka [Use of remote sensing and machine learning methods for monitoring cropland in the Far East]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XX International scientific congress*. In 8 vols. Novosibirsk: SSUGT; 2024;4(1): 20–25. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2024-4-1-20-25.
3. Garafutdinova LV, Kalichkin VK, Fedorov DS. Obektno-orientirovannaja klassifikacija izobrazhenij distancionnogo zondirovanija zemli s ispol'zovaniem mashinnogo obuchenija [Object-oriented classification of remotely sensed earth observation images using machine learning]. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2024;2: 37–47. (In Russian). DOI:10.31677/2072-6724-2024-71-2-37-47.
4. Danilov AS, Serdjukova EA. Avtomatizirovannoe obnaruzhenie plastika v akvatorijah s ispol'zovaniem dannyh distancionnogo zondirovanija i mashinnogo obuchenija [Automated detection of plastic in water areas using remotely sensed data and machine learning]. *Digital systems and models: theory and practice of design, development and application. Proceedings of the National (with international participation) scientific and practical conference (Kazan, April 10–11, 2024)*. Kazan: KSPEU; 2024: 779–782. (In Russian).
5. Eroshenko SA, Matrenin PV, Hal'jasmaa AI, et al. Tehnologija obrabotki dannyh dlja prognozirovanija pritoka vody v vodohranilishhe pri ispol'zovanii distancionnogo zondirovanija zemli i seti meteorologicheskikh i gidrologicheskikh postov [Data Processing Technology for the Forecasting of the Water Inflow into a Reservoir with the Use of Earth Remote Sensing and the Network of Meteorological and Hydrological Posts]. *Problems of the Regional Energetics*. 2022;4: 99–109. (In Russian) DOI:10.52254/1857-0070.2022.4-56-09.
6. Zolotoj AA, Novikov DI. Funkcija poter' pri obuchenii modelej detektirovanija lesnyh i pahotnyh zemel' na ajerofotosnimkah [Loss function for training detection models of forest and arable lands on aerial photographs]. *Actual problems of creating space systems for remote sensing of the Earth. Proceedings of the Twelfth International Scientific and Technical Conference*. Moscow: VNIEM Corporation; 2024: 114–117. (In Russian).
7. Korihin NN, Kovjazin VF. Neobhodimost' primenenija iskusstvennogo intellekta dlja obrabotki dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli [The need to apply artificial intelligence to the processing of remotely sensed Earth data]. *Actual Problems of the Forest Complex*. 2023;64: 61–66. (In Russian).
8. Sarafanov MI, Kazakov JJ, Nikitin NO, et al. Primenenie metodov mashinnogo obuchenija dlja zapolnenija propuskov v dannyh distancionnogo zondirovanija na osnove prostranstvennyh vzaimosvjazej [An approach to remote sensing data gap-filling using spatial dependencies and machine learning techniques]. *Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation "Earth and space" commemorating the birth centenary of academician Kirill Ya. Kondratyev*. St. Petersburg, 2020: 87–91. (In Russian).
9. Podol'skaja ES. Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa dlja raspoznavanija izobrazhenija dorog v lesnom hozjajstve [Use of remote sensing data from space for road image recognition in the forestry]. *Forest Science Issues*. 2022;5(4): 1–21. (In Russian). DOI:10.31509/2658-607x-202252-115.
10. Pavlova AI. Primenenie metodov mashinnogo obuchenija dlja agroekologicheskoy gruppировки sel'skohozjajstvennyh zemel' [Application of machine learning methods for agro-ecological grouping of agricultural lands]. *Mathematics, Its Applications and Mathematical Education (MAME23). Proceedings of the VIII International Conference*. Ulan-Ude: Publishing Department of East Siberia State University of Technology and Management; 2023: 162–166. (In Russian). DOI:10.53980/9785907599970\_162.
11. Rogachev SA. Analiz dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obuchenija [Analysis of Earth remote sensing data using machine learning methods]. *Applied Artificial Intelligence: Prospects and Risks. Proceedings of International Conference (St. Petersburg, October 17, 2024)*. St. Petersburg: SUAI; 2024: 309–311. (In Russian).

**AUTHORS** **Sergey S. Novikov**

Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”,  
Moscow, Russia

 0000-0002-4927-4542

**Tatiana V. Ilyushina**

 tilyushina@yandex.ru

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
Department of Land Management and Cadastre, Faculty of Territory Management  
Dr. of Sci. (Geography), Associate Professor

 0009-0008-7114-7479

**Polina E. Novikova**

 p.novikova93@mail.ru

Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”,  
Moscow, Russia

 0000-0001-8474-440X

Submitted: April 04, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Анализ современных технологий трехмерной идентификации объектов недвижимости для решения задач 3D-кадастра

Д.А. Гура<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

<sup>2</sup> Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

✉ gda-kuban@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Гура Д.А. Анализ современных технологий трехмерной идентификации объектов недвижимости для решения задач 3D-кадастра // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 175–186. DOI:10.30533/GiA-2025-037.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** трехмерная идентификация, ГИС, ГНСС, объект недвижимости, пространственные данные, методы фотограмметрии

**АННОТАЦИЯ** Целью исследования является анализ технологий трехмерной идентификации, включая глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), методы фотограмметрии и лазерное сканирование, и их применения в идентификации объектов недвижимости. В ходе исследования сравниваются существующие методы идентификации объектов, рассматриваются особенности их использования и задачи, которые данные технологии помогают решать. ГНСС для определения местоположения использует спутниковую навигацию, которая идеально подходит для определения местоположения объектов недвижимости и границ земельных участков. Методы фотограмметрии и лазерного сканирования предоставляют возможность перехода от 2D- к 3D-картам, которые позволяют получать точную информацию о состоянии объекта недвижимости и других его характеристиках. Представлен сравнительный анализ методов, данных, полученных в результате съемки территории, и их дальнейшей обработки, а также общей методики применения оборудования и правового обеспечения. Геоинформационная система благодаря возможностям анализа и визуализации пространственной информации, интеграции информации с картографическими данными позволяет принимать обоснованные решения для различных специализированных задач пространственного анализа. Сравнение вышечисленных технологий показало, что эффективность применения каждой из них зависит от конкретных задач и условий. Это подводит к выводу о целесообразности комбинированного использования технологий для детального учета объектов недвижимости в 3D-кадастре.

# 1 Введение

Современные объекты недвижимости обладают сложной пространственной структурой, что затрудняет их описание в 2D-формате. Трехмерная идентификация объектов недвижимости — это процесс высокоинформативного отображения местности и объектов, размещенных на ней, определения и описания объектов недвижимости с целью их учета, оценки и мониторинга. Трехмерная идентификация объектов недвижимости не только способствует улучшению управления земельными ресурсами, но и повышает прозрачность сделок и защищает права участников земельно-имущественных отношений. Этот процесс включает в себя сбор, обработку и анализ данных, в ходе которых устанавливаются индивидуальные характеристики объектов, позволяющие определить подлинность объекта.

В современном мире трехмерная идентификация объектов недвижимости важна в таких сферах, как кадастр недвижимости, градостроительство, оценка недвижимости и управление недвижимостью. Однако большой объем пространственных данных, который накоплен на сегодняшний день, имеет низкую актуальность и достоверность, что связано с отсутствием в Российской Федерации единой системы трехмерной идентификации объектов недвижимости [1]. Трехмерная идентификация позволяет:

- определять геометрию, текстуру и атрибуты объектов;
- связывать физические характеристики объекта с юридическими данными (права собственности, кадастровый номер);
- создавать цифровые двойники для управления жизненным циклом зданий.

В настоящее время среди задач, связанных с трехмерной идентификацией объектов недвижимости, актуальны следующие:

- 1) определение точных границ земельных участков в 3D-формате для кадастрового учета;
- 2) фиксация незаконных построек путем сравнения 3D-моделей с разрешительной документацией;
- 3) создание цифровых двойников зданий для BIM-проектирования;
- 4) расчет объемов строительных материалов (бетон, сталь) по данным сканирования;
- 5) мониторинг деформаций конструкций (трещины, просадки фундаментов) с помощью периодического сканирования;
- 6) визуализация скрытых коммуникаций (трубы, кабели) в 3D-моделях;
- 7) оценка соответствия объектов градостроительным нормам (высота, отступы, плотность застройки);
- 8) документирование объектов культурного наследия для реставрации и охраны;
- 9) планирование эвакуационных путей на основе 3D-моделей зданий;
- 10) анализ затенения территорий высотными зданиями для экологической экспертизы;
- 11) создание интерактивных 3D-карт для управления городской инфраструктурой;
- 12) инвентаризация промышленных объектов (трубопроводы, эстакады);
- 13) оценка рыночной стоимости недвижимости на основе точных 3D-данных;
- 14) автоматизация кадастрового учета через интеграцию с ЕГРН;
- 15) контроль качества строительства путем сравнения 3D-моделей с проектной документацией;
- 16) реконструкция утраченных элементов зданий (фасады, интерьеры);
- 17) создание виртуальных туров для аренды и продажи объектов;
- 18) анализ влияния новых построек на транспортные потоки и инфраструктуру;
- 19) фиксация повреждений после стихийных бедствий для страховых выплат;

- 20) планирование ландшафтного дизайна с учетом рельефа и существующих объектов;
- 21) идентификация объектов в труднодоступных местах (горные районы, плотная застройка);
- 22) создание 3D-архивов для исторических и архитектурных исследований;
- 23) интеграция данных в умном городе (умное освещение, парковки);
- 24) автоматическое распознавание объектов (окна, двери и т. д.) с помощью технологий искусственного интеллекта (ИИ);
- 25) оценка износа зданий для планирования капитального ремонта.

В современных кадастровых системах данные отображаются в двух плоскостях и не представляют физическую конфигурацию зданий, а также не позволяют своевременно выявить изменения, происходящие на городских территориях, что приводит к затруднениям при планировании и управлении территориями [2]. Поэтому трехмерная идентификация объектов актуальна в сфере развития городских территорий.

Трехмерный кадастр представляет собой реестр сведений об объектах недвижимости, а также модели местности, трехмерные модели объектов с фотографическими текстурами и визуализацию на карте подземных коммуникаций. Трехмерный кадастр помогает в разработке эффективных решений для развития городских территорий, эффективного налогообложения и зонирования территории. Характеристики трехмерных моделей объектов недвижимости обычно представлены в текстовой форме, однако графическое изображение объекта упрощает восприятие информации, позволяет оценить резервы территории и рассмотреть возможность комплексного развития различных элементов застройки [3, 4]. Для ведения трехмерного кадастра используют геоинформационные технологии, которые активно развиваются в направлении 3D-технологий. Геоинформационные системы (ГИС) — современные системы сбора, обработки и хранения пространственных данных (рис. 1) [5, 6]. Данные, полученные в ходе выполнения полевых работ, применяются для анализа и визуализации информации об объекте недвижимости. ГИС позволяет интегрировать информацию о недвижимости из различных источников, а благодаря глубокому анализу геоинформации повышается качество трехмерной идентификации объектов. Она принимает как пространственные данные (векторные, растровые данные и 3D-модели), так и атрибутивную информацию [7, 8]. Трехмерная идентификация объектов в ГИС может осуществляться с помощью алгоритмов для автоматической классификации объектов недвижимости [9].

**Рис. 1**  Индивидуальные характеристики объектов недвижимости  
**Fig. 1** Individual characteristics of real estate objects

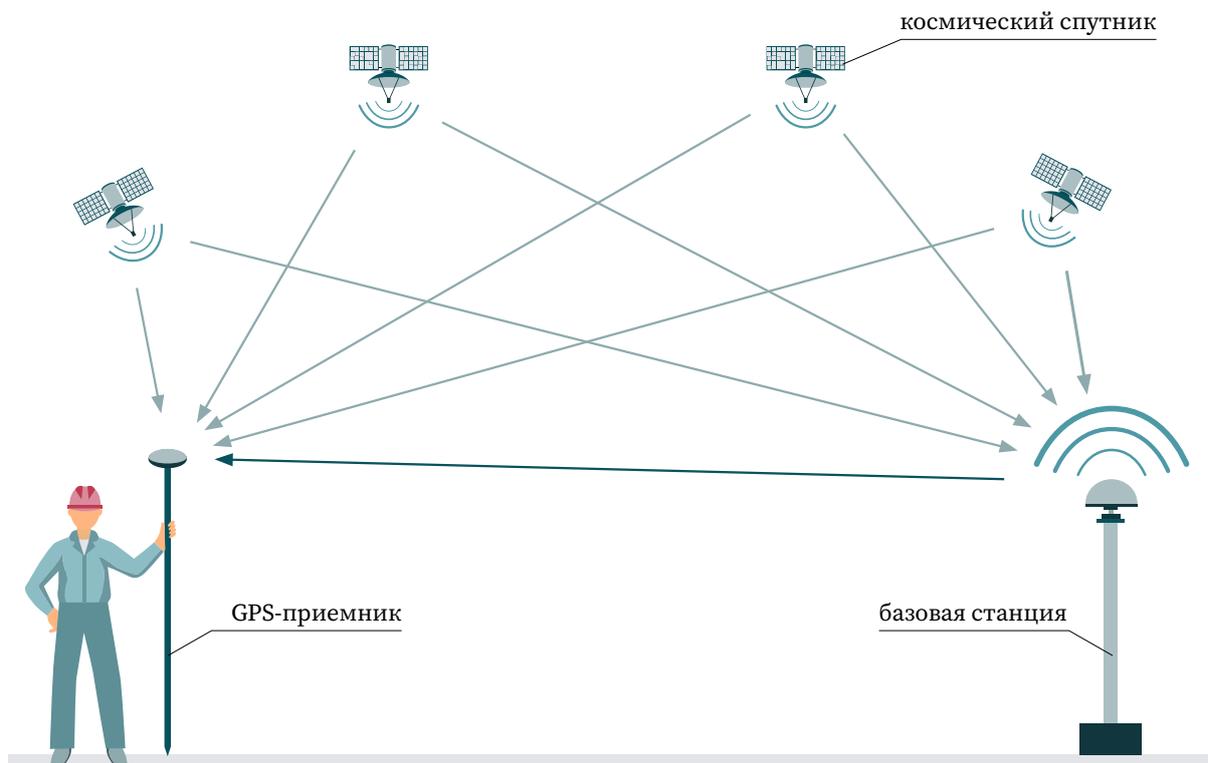
	BUILDING	A_STRT	A_HSNMBR	B_LEVELS	OSM_TYPE	OSM_ID	fid
1	yes	улица Энергет...	9	9	way	442337590	4447
2	yes	улица Энергет...	7	9	way	442337587	4444
3	yes	улица Энергет...	5	9	way	442337581	4438
4	yes	улица Энергет...	3	9	way	442337577	4434
5	yes	улица Энергет...	15	9	way	442337576	4433
6	yes	улица Энергет...	13	9	way	442337575	4432
7	yes	улица Энергет...	11	9	way	442337574	4431
8	apartments	Полярная улица	21	6	way	129095615	318
9	yes	Южная улица	8	5	way	128938073	205
10	apartments	Эскимосская у...	3	5	way	786264416	11492
11	apartments	Эскимосская у...	18/1	5	way	129096781	362
12	apartments	Эскимосская у...	18	5	way	129096814	389
13	apartments	Эскимосская у...	1	5	way	129096809	384
14	apartments	Школьная улица	18А	5	way	198258612	1894
15	apartments	Чукотская улица	3	5	way	129095613	316

## 2 Материалы и методы

К современным технологиям, используемым для сбора информации по трехмерной идентификации объектов недвижимости, относятся:

- глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС);
- методы фотограмметрии;
- лазерное сканирование.

ГНСС позволяет сократить временные затраты и обеспечить точность измерений 0,5–5 см. ГНСС-технологии хорошо подходят для определения координат земельных участков и объектов капитального строительства в частных секторах. Однако использование данного метода (рис. 2) на городской многоэтажной территории затруднительно в связи с тем, что сигналы от спутников могут прерываться из-за частых и высоких построек [10, 11]. В кадастровых работах в качестве ГНСС используют системы ГЛОНАСС и GPS.



**Рис. 2**  Принцип работы ГНСС  
**Fig. 2**  
The principle of GNSS operation

Фотограмметрия — это метод получения изображения земной поверхности с помощью фотографий, полученных с воздуха или земли. В трехмерной идентификации объектов недвижимости фотограмметрия позволяет определять параметры объектов и рассчитывать площади, занимаемые объектами недвижимости, с точностью от 5 до 8 см [12, 13].

В последнее время трехмерная фотограмметрия стала неотъемлемой частью ГИС и имеет актуальное значение на начальном этапе строительства здания для контроля этапов строительных работ и при дальнейшем использовании объекта, а также при полной или частичной его реконструкции [14, 15]. Своевременный мониторинг объектов строительства и реконструкции объектов позволяет контролировать сроки и качество выполнения работ (рис. 3).

Лазерное сканирование — современный вид съемки, который с помощью специального устройства (сканера) позволяет создавать 2D- и 3D-модели объектов (рис. 4) [16]. Точность результатов съемки зависит от вида съемки, но в среднем составляет 2–5 см.

Скорость съемки лазерным сканером может достигать 1 млн точек в секунду, при этом плотность в облаке точек составляет 1 мм – 1 м. Обзор лазерного сканера по горизонтали составляет 360°, а по вертикали — 270° [17, 18]. Лазерное

**Рис. 3** 3D-модель жилого комплекса

**Fig. 3** 3D-model of a residential complex



**Рис. 4** Модель облака точек объекта недвижимости

**Fig. 4** Real estate point cloud model



**Таблица 1** Сравнение современных технологий для трехмерной идентификации объектов недвижимости

**Table 1** Comparison of 3D real estate identification technologies

сканирование является важным инструментом в трехмерной идентификации объектов недвижимости, позволяя улучшить процессы проектирования и управления объектами недвижимости, а автоматизированный процесс сбора данных повышает их точность, информативность и достоверность.

Вышеперечисленные технологии трехмерной идентификации объекта недвижимости имеют свои особенности (табл. 1) и сферы применения (табл. 2).

Характеристика	ГНСС	Методы фотограмметрии	Лазерное сканирование
<b>Входные данные</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сигналы спутников (GPS, ГЛОНАСС);</li> <li>– данные с приемников (координаты, время);</li> <li>– коррекционные данные (RTK, SBAS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– аэрофотоснимки (с беспилотных летательных аппаратов, самолетов);</li> <li>– параметры камеры (фокусное расстояние, разрешение)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– точки лазерных отражений (LiDAR-данные);</li> <li>– данные инерциальных систем (IMU) для мобильного сканирования</li> </ul>
<b>Выводные данные</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– точные геодезические координаты (широта, долгота, высота);</li> <li>– границы земельных участков в 3D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ортофотопланы;</li> <li>– цифровые модели рельефа (ЦМР) и поверхности (ЦМП)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокодетализированные облака точек (млн точек/сек);</li> <li>– текстурированные 3D-модели</li> </ul>
<b>Общая методика применения</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– трилатерация / триангуляция для определения положения;</li> <li>– использование дифференциальных поправок (RTK, PPK) для повышения точности;</li> <li>– интеграция с ГИС для визуализации и анализа данных</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– структура из движения (SfM) для построения 3D-моделей;</li> <li>– стереообработка для измерения высот;</li> <li>– калибровка снимков с использованием ГНСС-меток</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– территориальное сканирование (стационарные сканеры);</li> <li>– мобильное сканирование (автомобили, дроны);</li> <li>– фильтрация шумов и классификация точек</li> </ul>
<b>Видеоалгоритм</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– запись спутниковых сигналов;</li> <li>– обработка данных с коррекционными сервисами;</li> <li>– экспорт координат в ГИС или CAD-системы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– аэрофотосъемка объекта;</li> <li>– построение облака точек в Agisoft Metashape;</li> <li>– экспорт модели в форматы OBJ, LAS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сканирование объекта (например, здания);</li> <li>– регистрация облаков точек в Leica Cyclone;</li> <li>– постобработка (удаление шумов, создание BIM-моделей)</li> </ul>
<b>Оборудование</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГНСС-приемники (геодезические, RTK);</li> <li>– антенны;</li> <li>– ПО для постобработки (Trimble Business Center, Leica Geo Office)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– беспилотные летательные аппараты (DJI Phantom, Matrice);</li> <li>– цифровые камеры (Sony Alpha, Zenmuse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– лидарные сканеры (Faro, Leica);</li> <li>– мобильные платформы (дроны с LiDAR)</li> </ul>
<b>Правовое обеспечение</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– соблюдение требований к геодезическим работам;</li> <li>– лицензирование высокоточного оборудования;</li> <li>– учет GDPR при работе с персональными данными</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разрешения на полеты (Федеральное агентство воздушного транспорта, местные регуляции);</li> <li>– согласие на съемку частных территорий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сертификация лазерного оборудования (класс безопасности);</li> <li>– соблюдение правил съемки в охраняемых зонах</li> </ul>

**Таблица 2** 

Сферы применения трехмерной идентификации объектов недвижимости и современные технологии

**Table 2**

Application areas of 3D identification of real estate objects and modern technologies

	Задача	ГНСС	Методы фотограмметрии	Лазерное сканирование
1	Определение точных границ земельных участков в 3D-формате для кадастрового учета	+	+	+
2	Фиксация незаконных построек путем сравнения 3D-моделей с разрешительной документацией	±	+	+
3	Создание цифровых двойников зданий для BIM-проектирования	-	+	+
4	Расчет объемов строительных материалов по данным сканирования	-	+	+
5	Мониторинг деформаций конструкций с помощью периодического сканирования	±	-	+
6	Визуализация скрытых коммуникаций в 3D-моделях	-	-	+
7	Оценка соответствия объектов градостроительным нормам	-	+	+
8	Документирование объектов культурного наследия для реставрации и охраны	-	+	+
9	Планирование эвакуационных путей на основе 3D-моделей зданий	-	+	+
10	Анализ затенения территорий высотными зданиями для экологической экспертизы	-	+	-
11	Создание интерактивных 3D-карт для управления городской инфраструктурой	-	+	±
12	Инвентаризация промышленных объектов	±	+	+
13	Оценка рыночной стоимости недвижимости на основе точных 3D-данных	-	+	+
14	Автоматизация кадастрового учета через интеграцию с ЕГРН	+	±	±
15	Контроль качества строительства путем сравнения 3D-моделей с проектной документацией	-	+	+
16	Реконструкция утраченных элементов зданий	-	+	+
17	Создание виртуальных туров для аренды и продажи объектов	-	+	+
18	Анализ влияния новых построек на транспортные потоки и инфраструктуру	-	+	±
19	Фиксация повреждений после стихийных бедствий для страховых выплат	±	+	+
20	Планирование ландшафтного дизайна с учетом рельефа и существующих объектов	±	+	+
21	Идентификация объектов в труднодоступных местах	±	-	+
22	Создание 3D-архивов для исторических и архитектурных исследований	-	+	+
23	Интеграция данных в умном городе (умное освещение, парковки)	±	-	±
24	Автоматическое распознавание объектов (окна, двери) с помощью ИИ	-	+	±
25	Оценка износа зданий для планирования капитального ремонта	-	+	+

**Примечание.** Знаком «+» обозначена применимость технологии для решения задачи, связанной с трехмерной идентификацией объектов недвижимости, знаком «±» — частичная применимость, знаком «-» — неприменимость.

### 3 Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ показал, что для выбора технологии идентификации объектов недвижимости необходимо обращать внимание на поставленные задачи. ГНСС позволяет определять координаты с высокой точностью и играет ключевую роль в геопозиционировании. Основной областью применения является кадастровый учет, а в особенности определение границ земельного участка, однако использование данной технологии в оценке объектов недвижимости ограничено. С помощью ГНСС можно частично решать 7 задач в связи с тем, что она имеет низкую детализацию, а спутниковый сигнал зависит от труднодоступности территории съемки [19]. Методы фотограмметрии нашли применение в 18 задачах, которые требуют визуализации и текстуры, поэтому она широко используется для BIM-проектирования, анализа градостроительных норм [20, 21], а также подходит для задач, связанных с оценкой и планированием, но точность результатов съемки все же уступает лазерному сканированию и требует хорошей освещенности. Лазерное сканирование применяется в 19 вышеуказанных задачах и имеет наибольшую универсальность [22]. Данная технология обеспечивает высокую точность и детализацию, поэтому хорошо показывает себя при выполнении задач, связанных с мониторингом и контролем строительства [23], а также с созданием цифровых двойников и BIM-технологиями. Однако следует уделять большое внимание обработке данных лазерного сканирования [24].

Рассмотренные технологии хорошо дополняют друг друга, например, в таких задачах, как:

- определение границ земельных участков: ГНСС применяется для геопозиционирования, а лазерное сканирование и фотограмметрия — для 3D-детализации объектов; при этом лазерное сканирование позволяет раскрыть геометрические особенности участка (рельеф, сооружения), а фотограмметрия добавляет текстуры и цвета;
- контроль строительства: методы фотограмметрии позволяют не только изучить текстуру и цветовые характеристики объекта, но и эффективно документировать процесс строительства на каждом этапе работы, а лазерное сканирование обеспечивает высокую точность измерений, что важно для контроля геометрии здания или сооружения и выявления отклонения от проектных данных;
- инвентаризация объектов недвижимости: ГНСС используется для геопозиционирования объектов, а лазерное сканирование и фотограмметрия применяются для моделирования объектов.

### 4 Выводы

Актуализация кадастровой информации об объектах недвижимости является важной задачей, обеспечивающей точность и своевременность получения данных. Современные технологии трехмерной идентификации объектов играют ключевую роль в этом процессе в аспекте наполнения достоверной информацией 3D-кадастра.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что современные технологии трехмерной идентификации объектов представляют собой мощные инструменты для анализа и оценки объектов недвижимости. Каждый из рассмотренных методов обладает уникальными возможностями и ограничениями, которые необходимо учитывать при выборе технологии трехмерной идентификации объектов недвижимости в зависимости от задач их применения. ГНСС идеально подходит для геопозиционирования объектов благодаря своей точности определения координат. Методы фотограмметрии и лазерное сканирование помогают визуализировать объекты недвижимости

и окружающую территорию, в том числе их текстуры и другие внешние характеристики, позволяющие создавать 3D-модели объектов. После анализа всех возможных задач применения технологии трехмерной идентификации объектов было выявлено, что совместное использование современных технологий способствует оптимизации процесса идентификации пространственных данных и повышению эффективности распознавания объектов недвижимости, что, в свою очередь, положительно повлияет на наполнение актуальными данными 3D-кадастра объектов недвижимости.

**БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Главатских Л.Ю., Ильиных А.Л. Варианты решения задачи идентификации пространственных данных в системе объектов недвижимости // Гео-Сибирь. 2010. Т. 3. № 1. С. 255–258.
2. Лисицкий Д.В., Чернов А.В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 2. С. 153–170.
3. Чернова У.Ю. Формирование трехмерного кадастра недвижимости в России // Дневник науки. 2021. № 2(50). С. 39.
4. Крючкова Ю.А., Краснопахтова Л.И. Перспективы применения 3D-кадастра в России // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2016. № 16-1. С. 159–161.
5. Полковникова Е.М. Использование ГИС-технологий в кадастровом учете земель // Современные проблемы и перспективы развития земельно-имущественных отношений: сборник статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар: КубГАУ, 2021. С. 246–251.
6. Shugulova D.K., Dmitriev P.S., Fomin I.A. The use of GIS technology in predicting flood areas // Вестник Северо-Казахстанского государственного университета им. Манаша Козыбаева. 2019. № 4(45). С. 33–37.
7. Ахметова Н.И., Ахметов Р.Ш. Мобильные ГИС как новое направление в развитии ГИС-технологий // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции (Оренбург, 25–26 ноября 2020 г.). Оренбург: ИП Востриков К «Полиарт», 2020. С. 436–438.
8. Ступин В.П., Пластинин Л.А. Идентификация растительности по результатам ГИС-анализа данных ДЗЗ в интересах картографирования растительного покрова Сибири // Сборник материалов XIX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 1. № 2. С. 74–81. DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-2-74-81.
9. Анашкин П.А. Цифровые информационные модели как инструмент исследования геопространства // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27. № 3. С. 19–29. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-3-19-29.
10. Парников В.Е., Афонин В.В., Далбараев А.С. Анализ возможности использования ГИСС-технологий в различных сферах народного хозяйства // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 10-1(85). С. 93–96. DOI:10.24412/2500-1000-2023-10-1-93-96.
11. Абдульманов Р.И., Погодин В.А. Современные GPS (GNSS)-технологии // Вестник науки. 2019. Т. 2. № 4(13). С. 72–75.
12. Bondarenko S.Y., Grushin S.P., Frolov Ya.V., et al. Photogrammetry in archaeology: modern technologies of documentation and reconstruction (projects of the rec of Altaic studies and turkology “Great Altai”) // Народы и религии Евразии. 2024. Т. 29. № 2. С. 31–46. DOI:10.14258/nreur (2024)2-02.
13. Алябьев А.А., Иванов А.Е., Кобзев А.А. и др. Фотограмметрия в развитии городских агломераций // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27. № 1. С. 30–41. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-1-30-41.
14. Башимов А.Ш. Отражение прошлого в трехмерном пространстве: фотограмметрия как ключевой инструмент в географических и исторических исследованиях достопримечательностей // Инновационная наука. 2023. № 12-2. С. 250–253.
15. Галайда И.И. Фотограмметрия как эффективный метод фотофиксации больших объектов под водой в сложных условиях // Вопросы подводной археологии. 2019. № 10. С. 22–29.

16. Брылев И.С., Бударова В.А. Применение комплекса цифровых технологий для формирования трехмерного объекта недвижимости городского пространства // Геодезия и картография. 2024. Т. 85. № 3. С. 42–49. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1005-3-42-49.
17. Суфиянов Р.Ш. Лазерное сканирование объектов // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 85-1. С. 117–120. DOI:10.18411/trnio-05-2022-35.
18. Нехин С.С., Бабашкин Н.М. Лазерное сканирование и перспективы его применения для целей топографического картографирования и кадастра // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 2022. № 1(25). С. 29–39. DOI:10.25587/SVFU.2022.25.1.011.
19. Manyashin A.V. The use of GNSS-monitoring data in the synthesis of vehicle driving cycles // German International Journal of Modern Science. 2021. No. 23. P. 50–52. DOI:10.24412/2701-8369-2021-23-50-52.
20. Богатырев И.С. Фотограмметрия в современном мире // Матрица научного познания. 2023. № 3-2. С. 44–51.
21. Конушина Е.Ю., Симашева Д.В. Фотограмметрия как основополагающая дисциплина современного геодезиста // Перспективные разработки и прорывные технологии в АПК: сборник материалов национальной научно-практической конференции (Тюмень, 21–23 октября 2020 г.). Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2020. С. 30–34.
22. Портнов А.М., Добровольский Д.О. Сравнительная оценка геометрической сложности контуров объектов местности при осуществлении государственного земельного надзора и мониторинга земель на примере объектов капитального строительства // Геодезия и картография. 2024. Т. 85. № 3. С. 50–61. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1005-3-50-61.
23. Аврунев Е.И., Горобцов С.Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ: монография. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. 239 с.
24. Гура Д.А. Применение технологий искусственного интеллекта в кадастре и геодезии: современное состояние и перспективы // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30. № 1. С. 126–136. DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-1-126-136.

**АВТОР** **Гура Дмитрий Андреевич**

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени 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

Поступила 05.12.2024. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Analysis of modern technologies of three-dimensional identification of real estate objects for solving 3D-cadastral problems

**Dmitry A. Gura**<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

<sup>2</sup> Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

✉ gda-kuban@mail.ru

**CITATION** Gura DA. Analysis of modern technologies of three-dimensional identification of real estate objects for solving 3D-cadastral problems. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 175–186. DOI:10.30533/GiA-2025-037.

**KEYWORDS** identification, GIS, GNSS, real estate object, spatial data, photogrammetry

**ABSTRACT** The purpose of the study is to analyze technologies for three-dimensional identification of real estate objects and substantiate the need to introduce three-dimensional identification into cadastral systems in order to improve data accuracy. As a result of the research, it is necessary to compare existing object identification technologies and identify their advantages and disadvantages. The article analyzes modern technologies of three-dimensional identification of real estate objects, including GNSS, GIS, photogrammetry and laser scanning. The Global Navigation satellite system uses satellite navigation to determine location, which is ideal for determining the location of real estate and land boundaries. The geoinformation system, thanks to the capabilities of analyzing and visualizing spatial information, as well as integrating information with cartographic data, allows you to make informed decisions for various specialized spatial analysis tasks. With the help of photogrammetry and laser scanning, it is possible to switch from 2D to 3D-maps, which allow you to obtain accurate information about the condition of the property and its other characteristics. A comparative analysis of the methods, their accuracy, advantages and disadvantages are presented. Special attention is paid to data integration and the creation of 3D models in GIS. When comparing the above technologies, it was concluded that the effectiveness of each of them depends on specific tasks and conditions. As a result of comparing the methods, it was concluded that the combined use of technologies for detailed study of objects in the 3D-cadastral is advisable.

- REFERENCES**
1. Glavatskikh LYu, Ilyinykh AL. Varianty reshenija zadachi identifikacii prostranstvennyh dannyh v sisteme ob"ektov nedvizhimosti [Variants of solving the problem of spatial data identification in the system of real estate objects]. *Geo-Siberia*. 2010;3(1): 255–258. (In Russian).
  2. Lisitsky DV, Chernov AV. Teoreticheskie osnovy trehmernogo kadastra ob"ektov nedvizhimosti [Theoretical foundations of a three-dimensional real estate cadastre]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(2): 153–170. (In Russian).
  3. Chernova UYu. Formirovanie trehmernogo kadastra nedvizhimosti v Rossii [Formation of a three-dimensional real estate cadastre in Russia]. *Diary of Science*. 2021;2(50): 39. (In Russian).
  4. Kryuchkova YuA, Krasnoplakhtova LI. Perspektivy primenenija 3D-kadastra v Rossii [Prospects for the use of 3D cadastre in Russia]. *Fundamental and Applied Research in the Modern World*. 2016;16-1: 159–161. (In Russian).
  5. Polkovnikova EM. Ispol'zovanie GIS-tehnologij v kadastrvom uchete zemel' [The use of GIS technologies in the cadastral registration of lands]. *Modern Problems and Prospects of Development of Land and Property Relations. Collection of articles of the III All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnodar: KubSAU; 2021: 246–251. (In Russian).
  6. Shugulova DK, Dmitriev PS, Fomin IA. The use of GIS technology in predicting flood areas. *Vestnik of the North Kazakhstan University named after M. Kozybayev*. 2019;4(45): 33–37. (In Russian).
  7. Akhmetova NI, Akhmetov RS. Mobil'nye GIS kak novoe napravlenie v razvitii GIS-tehnologij [Mobile GIS as a new direction in the development of GIS technologies]. *Regional problems of Geology, Geography, Technosphere and Environmental Safety. Collection of articles of the II All-Russian Scientific and Practical Conference (Orenburg, November 25–26, 2020)*. Orenburg: IP Vostrikov K "Polyart"; 2020: 436–438. (In Russian).
  8. Stupin VP, Plastinin LA. Identifikacija rastitel'nosti po rezul'tatam GIS-analiza dannyh DZZ v interesah kartografirovanija rastitel'nogo pokrova Sibiri [Vegetation identification based on the results of GIS analysis of remote sensing data in the interests of mapping the vegetation cover of Siberia]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XIX International scientific congress*. In 8 vols. Novosibirsk: SSUGT; 2023;1(2): 74–81. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-2-74-81.
  9. Anashkin PA. Cifrovye informacionnye modeli kak instrument issledovanija geoprostranstva [Digital information models as a tool for geospatial research]. *Vestnik SSUGT*. 2022;27(3): 19–29. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-3-19-29.
  10. Parnikov VE, Afonin VV, Dalbaraev AS. Analiz vozmozhnosti ispol'zovanija GNSS-tehnologij v razlichnyh sferah narodnogo hozjajstva [Analysis of the possibility of using GNSS technologies in various spheres of the national economy]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;10-1(85): 93–96. (In Russian). DOI:10.24412/2500-1000-2023-10-1-93-96.
  11. Abdulmanov RI, Pogodin VA. Sovremennye GPS (GNSS)-tehnologii [Modern GPS (GNSS) technologies]. *Bulletin of Science*. 2019;2(4(13)): 72–75. (In Russian).
  12. Bondarenko SY, Grushin SP, Frolov YaV, et al. Photogrammetry in archaeology: modern technologies of documentation and reconstruction (projects of the rec of altaic studies and turkology "Great Altai"). *Nations and Religions of the Eurasia*. 2024;29(2): 31–46. DOI:10.14258/nreur (2024)2-02.
  13. Alyabyev AA, Ivanov AE, Kobzev AA, et al. Fotogrammetrija v razvitii gorodskih aglomeracij [Photogrammetry in the development of urban agglomerations]. *Vestnik SSUGT*. 2022;27(1): 30–41. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-1-30-41.
  14. Bashimov AS. Otrazhenie proshlogo v trehmernom prostranstve: fotogrammetrija kak kljuchevoj instrument v geograficheskikh i istoricheskikh issledovanijah dostoprimechatel'nostej [Reflection of the past in three-dimensional space: photogrammetry as a key tool in geographical and historical research of landmarks]. *Innovative Science*. 2023;12-2: 250–253. (In Russian).
  15. Galaida II. Fotogrammetrija kak jeffektivnyj metod fotofiksacii bol'shikh ob"ektov pod vodoj v slozhnyh uslovijah [Photogrammetry as an effective method of photographing large objects underwater in difficult conditions]. *Problems of Underwater Archaeology*. 2019;10: 22–29. (In Russian).
  16. Brylev IS, Budarova VA. Primenenie kompleksa cifrovych tehnologij dlja formirovanija trehmernogo ob"ekta nedvizhimosti gorodskogo prostranstva [Application

- of a complex of digital technologies for the formation of a three-dimensional real estate object of urban space]. *Geodesy and Cartography*. 2024;85(3): 42–49. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1005-3-42-49.
17. Sufiyarov RS. Lazernoe skanirovanie ob'ektov [Laser scanning of objects]. *Trends in the Development of Science and Education*. 2022;85-1: 117–120. (In Russian). DOI:10.18411/trnio-05-2022-35.
  18. Nekhin SS, Babashkin NM. Lazernoe skanirovanie i perspektivy ego primeneniya dlja celej topograficheskogo kartografirovaniya i kadastra [Laser scanning and prospects of its application for the purposes of topographic mapping and cadastre]. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series of Earth Sciences*. 2022;1(25): 29–39. (In Russian). DOI:10.25587/SVFU.2022.25.1.011.
  19. Manyashin AV. The use of GNSS-monitoring data in the synthesis of vehicle driving cycles. *German International Journal of Modern Science*. 2021;23: 50–52. DOI:10.24412/2701-8369-2021-23-50-52.
  20. Bogatyrev IS. Fotogrammetrija v sovremennom mire [Photogrammetry in the modern world]. *Matrix of Scientific Knowledge*. 2023;3-2: 44–51. (In Russian).
  21. Konushina EYu, Simasheva DV. Fotogrammetrija kak osnovopolagajushhaja disciplina sovremennogo geodezista [Photogrammetry as a fundamental discipline of a modern surveyor]. *Promising Developments and Breakthrough Technologies in the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference (Tyumen, October 21–23, 2020)*. Tyumen: SAU of the Northern Urals; 2020: 30–34. (In Russian).
  22. Portnov AM, Dobrovolsky DO. Sravnitel'naja ocenka geometricheskoy slozhnosti konturov ob'ektov mestnosti pri osushhestvlenii gosudarstvennogo zemelnogo nadzora i monitoringa zemel' na primere ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva [Comparative assessment of the geometric complexity of the contours of terrain objects in the implementation of state land supervision and land monitoring using the example of capital construction projects]. *Geodesy and Cartography*. 2024;85(3): 50–61. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1005-3-50-61.
  23. Avrunev EI, Gorobtsov SR. *Geodezicheskoe obespechenie kadastrykh rabot* [Geodetic support of cadastral works] [monograph]. Novosibirsk: SSUGT; 2024. 239 p. (In Russian).
  24. Gura DA. Primenenie tehnologij iskusstvennogo intellekta v kadastre i geodezii: sovremennoe sostojanie i perspektivy [Application of artificial intelligence technologies in cadastre and geodesy: current state and prospects]. *Vestnik SSUGT*. 2025;30(1): 126–136. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-1-126-136.

**AUTHOR 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

Submitted: December 05, 2024. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.



# Методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений

**Н.Х. Голыгин<sup>1</sup>✉, В.Г. Лысенко<sup>2</sup>, В.П. Савиных<sup>1</sup>,  
И.Г. Чугреев<sup>1</sup>, В.А. Шилин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр прикладной метрологии — Ростест,  
Москва, Россия

✉ nx\_golygin@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Савиных В.П., Чугреев И.Г., Шилин В.А. Методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 187–202. DOI:10.30533/GiA-2025-041.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** мобильные координатные средства измерений, дискретное преобразование Фурье, оптико-электронный комплекс, аффинные преобразования, искусственная нейронная сеть, эксцентриситеты

**АННОТАЦИЯ** В данной работе описаны методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений (МКСИ). Представлены методы обработки результатов исследований на оптико-электронном комплексе, связанные с метрологическим обеспечением круговых горизонтальных и вертикальных измерительных систем МКСИ. Рассмотренные в статье методики обработки результатов исследований погрешности электронных тахеометров с применением дискретного преобразования Фурье, аффинных преобразований и искусственной нейронной сети позволили повысить точность измерений горизонтальных и вертикальных углов на оптико-электронном комплексе для испытаний, поверки и калибровки МКСИ. При этом отмечено, что использование конкретной методики обработки результатов измерений зависит от поставленной задачи исследования. Отмечается, что в случае ортогональности осей поворотного стола и призмы горизонтальной плоскости при поверке МКСИ достаточно использовать метод аффинных преобразований, так как здесь автоматически устраняется влияние эксцентриситетов расположения МКСИ над призмой и самой призмы

на поворотном столе. Если же результаты исследований не в допуске, то может быть использована методика обработки результатов исследований с применением гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье, которая позволяет проанализировать результаты измерений, выявить, к чему относятся погрешности измерений (к компаратору или МКСИ), после чего принимается решение об устранении соответствующих гармоник (может быть построена линия регрессии, характеризующая систематическую погрешность измерений МКСИ).

## 1 Введение

В 1924 году СССР по Женевской конвенции для обеспечения единства измерений были переданы 4 инварных трехметровых жезла первого разряда. Один из них был направлен в Ташкент, другой — в Тбилиси, а два были переданы в Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК).

В 1925 году по приказу начальника государственного технического бюро «Аэрофотосъемка» М.Д. Бонч-Бруевича в МИИГАиК было начато строительство оптико-механического линейного компаратора, на котором выполнялись практически до конца прошлого столетия только поверки инварных проволок длиной 24 м, использовавшихся при проложении высокоточных геодезических сетей и проверки длин эталонных базисов.

Переданные МИИГАиК эталонные жезлы раз в два года поверялись во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в Ленинграде (Санкт-Петербурге), при этом перерыв был только во время блокады Ленинграда. До 1935 года длина жезлов линейно увеличивалась, после чего она стабилизировалась на размере 3 000,028 мм.

До конца прошлого столетия поверка инварных проволок выполнялась по договорам с ФГБУ «Ростест — Москва». В 2003 году в связи с отсутствием необходимости поверки инварных проволок руководством МИИГАиК было принято решение о модернизации линейного оптико-механического компаратора с целью создания оптико-электронного 3D-комплекса (ОЭК) для метрологического обеспечения мобильных координатных средств измерений (МКСИ). В 2008 году управлением метрологии Росстандарта на основе материальной базы МИИГАиК был утвержден совместный центр эталонов «ВНИИМС — МИИГАиК» с целью повышения точности измерений МКСИ пространственных координат в геодезии, а также геометрических параметров поверхностей сложной формы в других отраслях отечественной промышленности (лазерных трекеров, радаров, электронных тахеометров, измерительных систем с цифровыми нивелирами и других координатных средств измерений).

При метрологическом обеспечении МКСИ для выявления погрешности измерений ими сферических и декартовых координат во множестве точек задекларированного пространства измерений необходимо скомпенсировать методические и инструментальные погрешности эталонов. Особую сложность представляет компенсация погрешностей эталонов угла. Некоторые из перечисленных МКСИ, используемые в качестве средств измерений (СИ), не имеют уровней и центриров, при этом в процессе обработки результатов поверки или калибровки СИ необходимо компенсировать погрешности, связанные с эксцентриситетами расположения осей исследуемого СИ и эталона, наклонами вертикальной оси, отклонением от окружности вращения поворотного стола и др.

В современных, особенно критических, технологиях, во-первых, резко уменьшились допуски на изготовление как отдельных деталей, так и изделий в целом, во-вторых, например, при изготовлении турбинных лопаток требуется знание координат более 3000 точек. Поэтому иностранные методики исследований, выявляющие погрешности измерений, как правило, в небольшом количестве точек и с перестановкой МКСИ [1–3], не обеспечивают точность измерений в нормированных диапазонах измерений. При этом выявляется только погрешность

измерений длины линии в пространстве, а не пространственные сферические или прямоугольные координаты. Кроме того, в связи с санкциями, отсутствием отечественных эталонных лазерных интерферометров и другими ограничениями на импорт задача повышения точности эталонных СИ становится особенно актуальной.

На основе изложенного выше и анализа предыдущих изысканий [4–7] были разработаны конструкции отдельных компараторов ОЭК и программное обеспечение методов обработки результатов исследований горизонтальных и вертикальных угловых измерительных систем МКСИ. В данной работе приведены конструкции отдельных компараторов ОЭК и методики математической обработки результатов исследований горизонтальных и вертикальных измерительных систем 3D-координатных МКСИ.

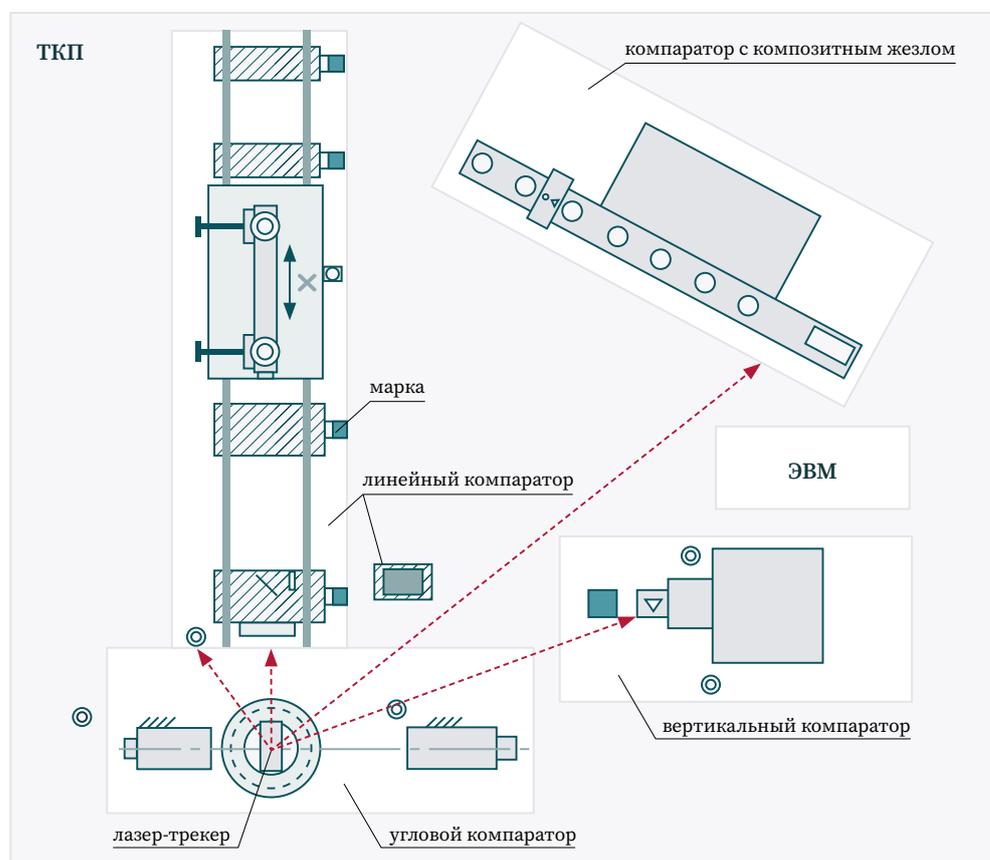
## 2 Материалы и методы

### 2.1 Конструкции отдельных компараторов оптико-электронного комплекса

Разработанный ОЭК расположен в термоконстантном помещении. Схема расположения отдельных линейных и угловых компараторов ОЭК показана на рис. 1. Линейный компаратор с эталонным инварным 3-метровым жезлом и лазерным интерферометром используется для исследований линейных измерительных систем МКСИ в пределах до 48 м, угловой компаратор с эталонной 24-гранной призмой 1-го разряда — для исследований погрешности измерений горизонтальной измерительной системы МКСИ с шагом 15°, в компараторе с композитным жезлом и лазерным интерферометром применяется метод трилатерации

**Рис. 1**   
Схема расположения отдельных компараторов оптико-электронного комплекса

**Fig. 1**  
Arrangement of individual comparators of the optical-electronic complex



с введением предварительно определенных на линейном компараторе поправок на погрешность измерений длины для исследований погрешности измерений горизонтальной измерительной системы МКСИ в пределах  $15^\circ$  на разных установках поворотного стола; вертикальный компаратор с лазерным интерферометром на основе метода трилатерации используется для исследований вертикальной измерительной системы МКСИ в пределах  $\pm 50^\circ$ ; марки, положение которых разнесено по вертикали и горизонтали в пределах заданных производителем углов, служат для контроля ортогональности измеренных МКСИ пространственных координат.

На рис. 2 показана конструкция горизонтального углового компаратора для исследований погрешности измерений горизонтальных измерительных систем МКСИ при определении погрешности измерений по эталонной призме через  $15^\circ$ . На рис. 3 приведена конструкция компаратора для исследований погрешности измерений горизонтальной измерительной системы МКСИ в пределах от нуля до  $15^\circ$ .

Ранее в работе [8] была описана схема ОЭК и методы выполнения исследований в соответствии с указанными выше задачами разработки. В данной статье рассматриваются методы обработки результатов исследований, связанные с метрологическим обеспечением круговых горизонтальных и вертикальных измерительных систем МКСИ.

При разработке ОЭК приняты следующие основные принципы:

- 1) определение погрешности измерений МКСИ обеспечивается во всем рабочем диапазоне при его одной установке;
- 2) возможно исследование точности определения пространственных координат в любой точке пространства измерений;
- 3) погрешность измерений пространственных координат определяется в наиболее востребованном диапазоне до 48 м.

ОЭК позволяет решить следующие основные задачи:

- 1) исследовать погрешности измерений линейных измерительных систем МКСИ при длине радиуса-вектора в диапазоне измерений до 48 м с помощью как интерферометра, так и инварного жезла;

**Рис. 2**

Внешний вид горизонтального углового компаратора

**Fig. 2**

Appearance of the horizontal angular comparator

**Рис. 3**

Внешний вид компаратора с составным стержнем и лазерным интерферометром

**Fig. 3**

The appearance of comparator with composite rod and laser interferometer



**Рис. 4** ➔

Внешний вид вертикального компаратора с лазерным интерферометром

**Fig. 4**

Appearance of vertical comparator with laser interferometer



- 2) исследовать погрешность угловых горизонтальных (в пределах до 360°) и вертикальных (в пределах ±50°) измерительных систем МКСИ в любой точке заявленного пространства измерений;
- 3) осуществить контроль ортогональности полученных в результате исследований пространственных координат;
- 4) обеспечить контроль погрешности измерений длины линий в пространстве в соответствии с признанными международными нормативными документами.

На рис. 4 приведена конструкция вертикального компаратора для исследований погрешности измерений вертикальных измерительных систем МКСИ в пределах ±50°.

В процессе исследований горизонтальных и вертикальных угловых измерительных систем МКСИ на эталонном компараторе применены следующие методы обработки результатов измерений:

- метод на основе дискретного преобразования Фурье, позволяющий выполнить гармонический анализ полученных результатов измерений, а затем устранить влияние эксцентриситетов установки вертикальной оси исследуемого электронного тахеометра и оси многогранной призмы относительно оси поворотного стола путем введения поправок в составе постоянной составляющей  $a_0/2$  и коэффициентов ряда Фурье для 1-й гармоники функции погрешности измерений (кроме того, с помощью дискретного преобразования Фурье возможно применение методики моделирования эксцентриситетов для определения их величин);
- метод аффинных преобразований, позволяющий исключить из результатов измерений систематические составляющие погрешности измерений;
- метод с нейросетью, позволяющий уменьшить количество измерений для достижения поставленной цели.

Рассмотренные ниже методики обработки результатов исследований погрешности электронных тахеометров с применением дискретного преобразования Фурье, аффинных преобразований и искусственной нейронной сети позволили повысить точность измерений горизонтальных и вертикальных углов на ОЭК для испытаний, поверки и калибровки МКСИ.

## 2.2 Методика обработки результатов измерений с применением дискретного преобразования Фурье

Алгоритм обработки результатов измерений с применением дискретного преобразования Фурье описан ранее [8]. Рассмотрим этапы данной методики.

1. На поворотном столе соосно с 24-гранной призмой 1-го разряда устанавливался исследуемый электронный тахеометр. С использованием

автоколлиматора проводилось наведение на каждую грань, начиная с первой. Снимались отсчеты по электронному тахеометру для заданных гранями углов. При расчете погрешности измерений углов поворота призмы в прямом и обратном направлениях вращения стола учитывались поправки из аттестата призмы.

2. Вычислялись погрешности измерений углов электронным тахеометром  $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2 \dots \Delta\beta_N$ , т. е. определялась дискретная функция  $\Delta\beta(k)$ , где  $k = 1, 2, 3 \dots N$  – порядковый номер грани,  $N = 24$  – общее четное число граней.
3. Учитывая, что в данном случае при применении преобразования Фурье дискретная функция погрешности измерений углов электронным тахеометром описывается выражением

1 ➤ 
$$\Delta\beta(k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sum_{k=1}^{N/2} b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right),$$

определялись постоянная составляющая и коэффициенты ряда Фурье для 1-й гармоники

2 ➤ 
$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\beta(k), \quad a_{nk} = \Delta\beta(k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad b_{nk} = \Delta\beta(k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right),$$

где  $k = 1, 2 \dots N$  – значение текущего отсчета, соответствующего номеру грани призмы;

$n$  – номер гармоники.

С учетом полученных значений коэффициентов находится дискретная функция погрешности измерений углов для амплитуды 1-й гармоники для каждого отсчета

3 ➤ 
$$\Delta\beta_1(k) = \sqrt{a_{1k}^2 + b_{1k}^2},$$

где  $a_{1k}$  и  $b_{1k}$  – коэффициенты ряда Фурье для 1-й гармоники.

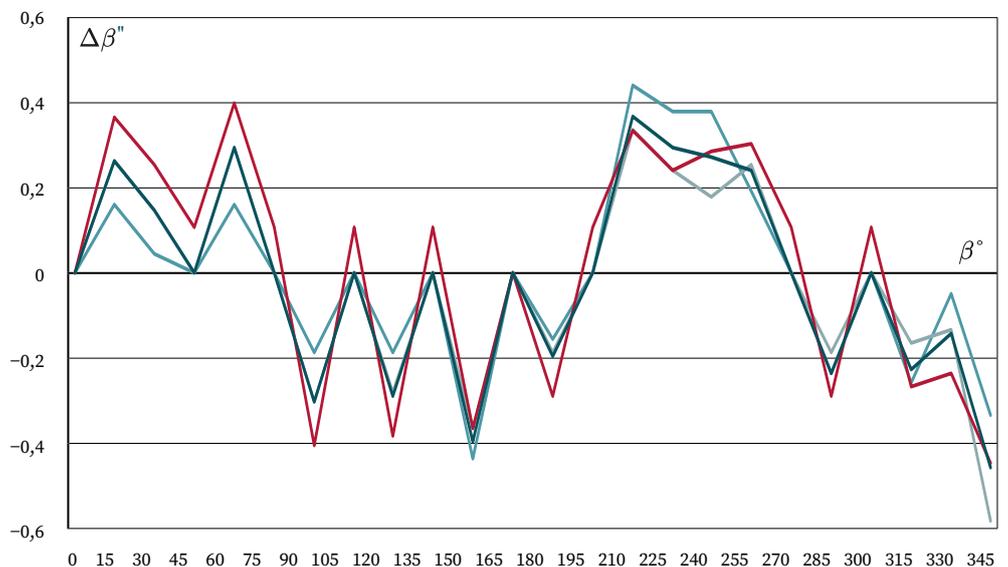
4. Из дискретного ряда значений погрешности измерений углов  $\Delta\beta(k)$  вычитаются постоянная составляющая и соответствующие значения дискретной функции для амплитуды 1-й гармоники

4 ➤ 
$$\Delta\beta(k)_{ck} = \Delta\beta(k) - \left(\frac{a_0}{2} + \Delta\beta_1(k)\right).$$

На рис. 5 показаны результаты коррекции погрешности измерений углового компаратора при аттестации его с помощью электронного тахеометра 1-го разряда Leica TC-2000. Измерения выполнялись при прямом и обратном вращении поворотного стола при ориентировании его по каждой из 24 граней призмы.

**Рис. 5** ➤  
Результаты коррекции погрешности измерений углового компаратора при аттестации его с помощью электронного тахеометра 1-го разряда Leica TC-2000

**Fig. 5**  
Results of correction of the measurement error of the angular comparator during its certification using an electronic total station of the 1st category Leica TC-2000



Введение поправок в составе постоянной составляющей  $a_0/2$  и коэффициентов ряда Фурье для 1-й гармоники  $\Delta\beta_1(k)$ , рассчитанных с помощью дискретного преобразования Фурье, позволяют устранить влияние эксцентриситетов установки вертикальной оси исследуемого электронного тахеометра и оси многогранной призмы относительно оси поворотного стола.

Анализ результатов исследований (рис. 5) показывает, что после устранения 1-й гармоники погрешность измерений уменьшилась в данном эксперименте в 12 раз и не превысила значения  $\pm 0,6''$  (без коррекции  $-7,2''$ ).

При обработке результатов измерений с помощью дискретного преобразования Фурье возможно применение методики моделирования эксцентриситетов для определения их величин. В экспериментальных исследованиях погрешности установки вертикальной оси исследуемого преобразователя электронного тахеометра (эксцентриситет  $e_{un}$ ) и оси многогранной призмы (эксцентриситет  $e_{np}$ ) относительно поворотного стола после обработки результатов методом описанного дискретного преобразования Фурье были получены следующие значения эксцентриситетов [6]:  $e_{np} = 0,0014$  мм;  $e_{un} = 0,0017$  мм. Расчеты с применением гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье выполнены при использовании программы Excel.

На рис. 6 приведен спектр амплитуд гармоник

$$\Delta\beta_n = f(n),$$

где  $n \leq N/2$  – номер гармоники, погрешности измерений  $\Delta\beta = f(\beta)$ , показанной на рис. 5 (кривая 1), определенный с помощью гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье.

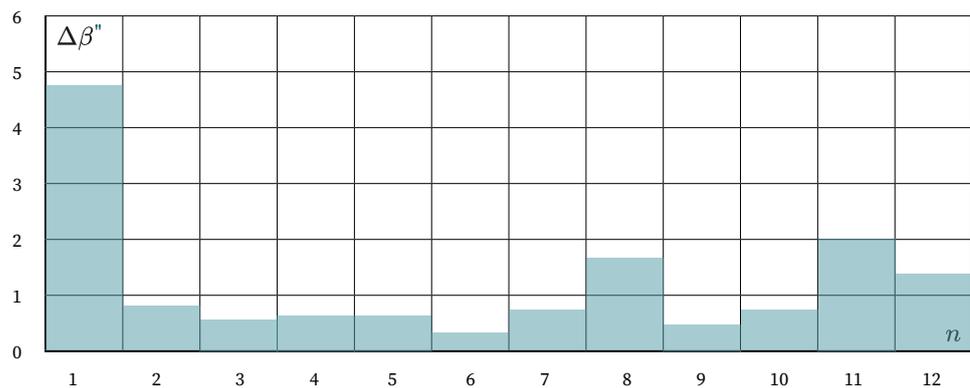
5 >

**Рис. 6** >

Спектр амплитуд гармоник  $\Delta\beta_n = f(n)$ , где  $n \leq N/2$  – номер гармоники, погрешности измерений  $\Delta\beta = f(\beta)$ , показанной на рис. 5 (кривая 1), определенный с помощью гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье

**Fig. 6**

Harmonic amplitude spectrum  $\Delta\beta_n = f(n)$  where  $n \leq N/2$  is the harmonic number, measurement error  $\Delta\beta = f(\beta)$  shown in Fig. 5 (Curve 1), determined using harmonic analysis based on discrete Fourier transform



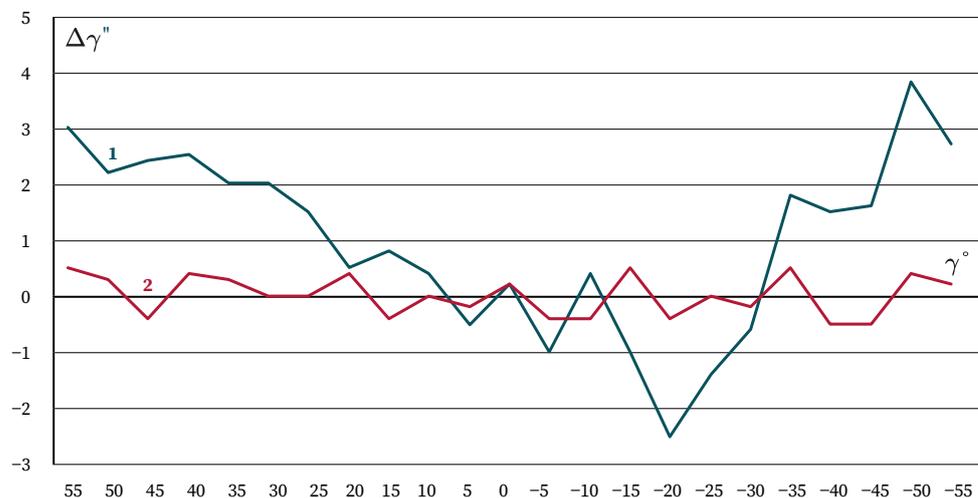
На рис. 7 приведены результаты исследований трилатерационным методом погрешности измерений вертикальной измерительной системы лазерного трекера: кривая 1 – до коррекции, кривая 2 – после обработки результатов измерений методом быстрого преобразования Фурье.

**Рис. 7** >

Результаты коррекции трилатерационным методом погрешности измерений вертикальной измерительной системы лазерного трекера

**Fig. 7**

Results of correction by the trilateration measurement error method of the vertical measuring system of the laser tracker



При обработке результатов измерений была устранена из спектра погрешности измерений 1-я гармоника, связанная с неподвижным положением отражателя трекера на подвижном столике вертикального компаратора. В результате устранения 1-й гармоники погрешность измерений уменьшилась в пять раз и не превысила 1".

Разработанный метод исследований с помощью гармонического анализа может быть использован и для линейных измерений.

### 2.3 Методика обработки результатов исследований с помощью искусственной нейронной сети

Практические аспекты использования искусственного интеллекта в метрологии рассмотрены, например, в [9]. Основные положения применения средств измерений на базе искусственного интеллекта (искусственной нейронной сети) определяет ГОСТ Р 71561-2024<sup>1</sup>.

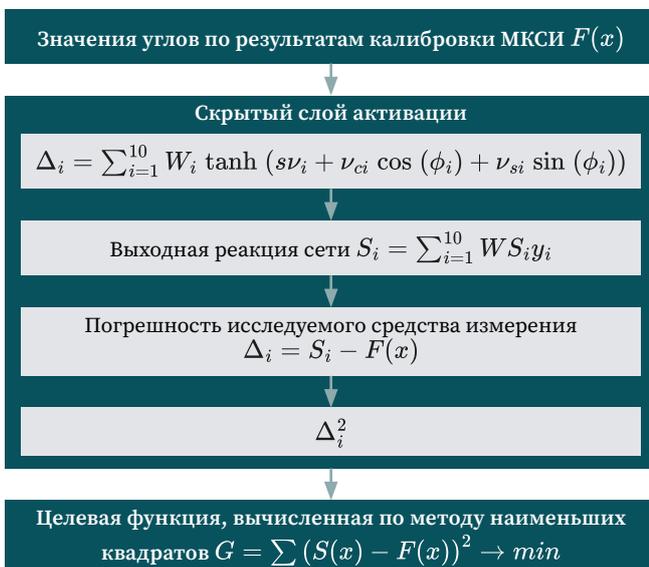
В МИИГАиК была разработана программа с искусственной нейронной сетью для исследований эксцентриситета горизонтальной угловой измерительной системы МКСИ [10]. Задача состоит в поиске наилучшего приближения функции, заданной конечным набором значений [11], когда дана выборка значений аргументов  $x_1 \dots x_n$  (установка призмы в градусах) и значения функции  $F(x_i)$  (значения измеренных МКСИ в этих точках углов). Требуется найти функцию  $Z(x_i)$ , ближайшую к функции  $F(x_i)$ . Для решения задачи использован метод наименьших квадратов, согласно которому целевая функция выражается уравнением вида

6 ➔ 
$$\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - F(x_i))^2 \rightarrow min.$$

Выходная реакция искусственной нейронной сети зависит от наперед заданных допусков на погрешность измерений. Для активации выходных сигналов нейронов использована функция в виде гиперболического тангенса, которая по сравнению, например, с сигмоидой позволяет при меньшем количестве измерений достичь требуемого результата и сохранить положительные результаты, находящиеся на границе наперед заданного допуска. Погрешность МКСИ вычисляется как

$$\Delta_i = Z(x_i) - F(x_i).$$

Рис. 8 7 ➔  
 Схема нейронной сети  
 Fig. 8  
 Neural network diagram



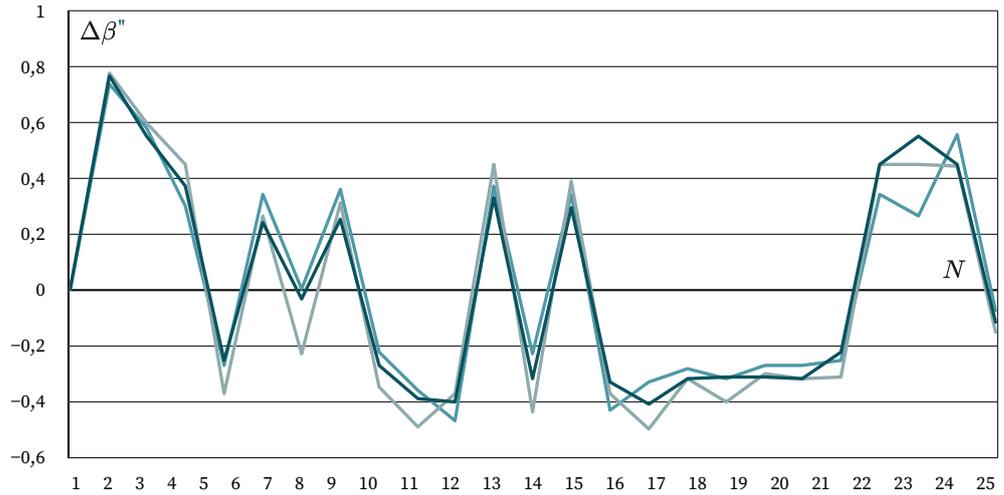
Для компенсации влияния эксцентриситета горизонтальной угловой измерительной системы МКСИ на основе предложенной методики обработки результатов исследований с искусственной нейронной сетью была разработана рабочая программа для ЭВМ. Схема нейросети приведена на рис. 8.

Результаты исследований эталонного тахеометра 1-го разряда Leica TC-1000 с применением разработанной программы приведены на рис. 9, из которого видно, что при заданном допуске 1,5" погрешность измерений в основном не превысила ±0,5".

1 ГОСТ Р 71561-2024. Средства измерений на основе искусственного интеллекта. Состав, структура и области применения. Основные положения. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 14 с.

**Рис. 9**  Погрешность измерений, вычисленная искусственной нейронной сетью,  $N$  – номер грани призмы

**Fig. 9** Measurement error calculated by the artificial neural network,  $N$  is the number of the prism face



### 2.4 Методика обработки результатов исследований с помощью аффинных преобразований

Аффинные преобразования используют в случае перпендикулярности осей поворотного стола и контрольной призмы плоскости горизонта. Проверить параллельность поворотного стола достаточно просто. Для проверки этого условия необходимо выполнить измерения по всем граням контрольной призмы на один отражатель. Полученные высоты по каждой грани контрольной призмы не должны превышать средней квадратической погрешности измерений углов  $\gamma$   $\sigma_{\gamma_{пред}}$  для данного расстояния  $S$  до отражателя:

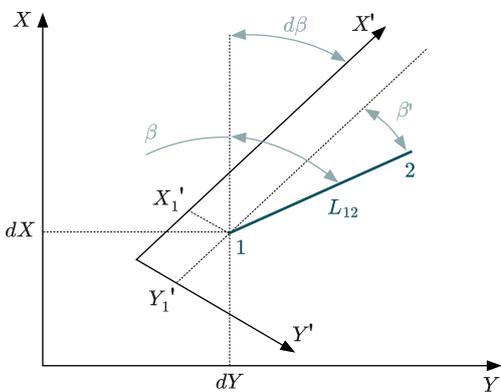
**8** 

$$\sigma_{h_{пред}} \geq \frac{S\sigma_{\gamma_{пред}}}{\rho}.$$

Тогда плоскость поворотного стола параллельна горизонтальной поверхности. В данном случае целесообразно использовать аффинные преобразования<sup>2</sup>. С целью компенсации систематической погрешности измерений при определении горизонтальных углов МКСИ разработана программа для ЭВМ для ее вычисления, основанная на выполнении измерений исследуемым МКСИ координат указанных выше марок-гнезд по граням эталонной призмы через 15°. По каждой грани измеряются координаты марок, после чего выполняется их приведение: доворот по углу  $\beta$  (рис. 10) в единую систему координат, совпадающую с измерениями по первой грани призмы (аффинные преобразования

**Рис. 10**  Схема поворота системы координат в плоскости  $XY$

**Fig. 10** The scheme of rotation of the coordinate system in the  $XY$  plane



координат). Разность между углами доворота горизонтальных углов  $\beta$  и соответствующими углами между гранями эталонной призмы свидетельствует о погрешности угловой измерительной системы исследуемого МКСИ.

Вычисления выполняются по следующим формулам:

**9** 

$$\operatorname{tg} \beta' = (y_2' - y_1') / (x_2' - x_1'),$$

**10** 

$$\operatorname{tg} \beta = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1),$$

**11** 

$$d\beta = \beta' - \beta,$$

**12** 

$$x_i = (x_i' - x_0') \times \cos d\beta - (y_i' - y_0') \times \sin d\beta + x_0,$$

<sup>2</sup> Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. М.: ДМК Пресс, 2018. 718 с.

- 13 ➤  $y_i = -(x_i' - x_0') \times \sin d\beta - (y_i' - y_0') \times \cos d\beta + y_0,$
- 14 ➤  $z_i = (z_i' - z_0') + z_o,$
- 15 ➤  $L_i = ((x_i' - x_1)^2 + (y_i' - y_1)^2)^{1/2},$
- 16 ➤  $\beta_i' = \arctg((y_i' - y_1)/(x_i' - x_1)),$
- 17 ➤  $\beta_i = \beta_I' + d\beta,$
- 18 ➤  $dx_i = L_i \times \cos \beta_i,$
- 19 ➤  $dy_i = L_i \times \sin \beta_i,$
- 20 ➤  $x_i = x_{01} + dx,$
- 21 ➤  $y_i = y_{01} + dy,$
- 22 ➤  $z_i = (z_i' - z_0') + z,$

где  $(x_i' - x_0'), (y_i' - y_0')$  – приращения координат точки в системе координат  $X'Y'Z'$ ;

$x_0', y_0'$  – координаты, принятые за начало системы координат  $X'Y'Z'$ ;

$d\beta$  – угол доворота осей координат;

$X_0, Y_0$  – координаты точки  $X_0', Y_0'$  в системе координат  $XYZ$ .

За начало систем координат  $XYZ$  и  $X'Y'Z'$  в процессе пересчета приняты координаты первой точки. Для преобразования высот точек снимаемого объекта достаточно выполнить параллельный перенос из условной системы координат  $X'Y'Z'$  в систему  $XYZ$ , так как ось  $Z$  ортогональна плоскости  $XY$ :

- 23 ➤  $z_i = (z_i' - z_0') + z_o,$

где  $z_o$  – высота точки  $X_0', Y_0'$  в системе координат  $XYZ$ .

На рис. 11 приведены графики зависимости погрешности измерений при аттестации углового горизонтального компаратора с помощью эталонного тахеометра 1-го разряда Leica TC-1000.

Применение предложенной методики обработки результатов исследований с помощью аффинных преобразований позволило уменьшить погрешность углового компаратора до величины, не превышающей  $\pm 0,8''$ , на уровне дискретности отсчитывания по электронному дисплею тахеометра.

**Рис. 11** ➤  
Зависимости погрешности измерений при аттестации углового горизонтального компаратора с помощью эталонного тахеометра 1-го разряда Leica TC-1000 после коррекции с использованием аффинных преобразований

**Fig. 11**  
Dependences of measurement error during attestation of an angular horizontal comparator using a Leica TC-1000 1st-class reference total station after correction using affine transformations



### 3 Результаты и обсуждение

Рассмотренные в данной статье методики обработки результатов измерений горизонтальных и вертикальных углов МКСИ при применении дискретного преобразования Фурье, аффинных преобразований и искусственной нейронной сети позволили повысить точность измерений углов в задекларированных производителями диапазонах измерений. При этом использование конкретной методики обработки результатов измерений зависит от поставленной задачи исследований. Например, в случае перпендикулярности осей поворотного стола и призмы горизонтальной плоскости при поверке МКСИ зачастую достаточно использовать метод аффинных преобразований, так как здесь автоматически устраняется влияние эксцентриситетов расположения МКСИ над призмой и самой призмы на поворотном столе. При допустимых результатах погрешности измерений исследования могут быть закончены.

Если результаты исследований не в допуске, тогда может быть использована методика обработки результатов исследований с применением гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье, которая позволяет проанализировать результаты измерений, выявить, к чему относятся погрешности измерений (к компаратору или МКСИ), после чего принять решение об устранении соответствующих гармоник (может быть построена линия регрессии, характеризующая систематическую погрешность измерений МКСИ).

Разработанная искусственная нейронная сеть с использованием для активации выходных сигналов нейронов гиперболического тангенса позволяет для достижения требуемого результата значительно уменьшить количество циклов измерений, что снижает трудоемкость исследований.

Разработанные методы воспроизведения эталонного горизонтального угла  $\beta$  на основе 24-гранной призмы 1-го разряда позволяют (за счет компенсации систематических погрешностей измерений на основе представленных выше методик) исследовать погрешности измерений горизонтальных измерительных систем МКСИ, обеспечивая измерение горизонтальных углов в пределах  $0 \div 360^\circ$  с погрешностью измерений не более  $0,5''$ , что в три раза меньше заявленной погрешности измерений угловых измерительных систем известных мобильных 3D-МКСИ, работающих в сферической системе координат, и являются достаточными для точности измерений МКСИ.

На разработанном горизонтальном линейном компараторе трилатерационный метод воспроизведения горизонтальных эталонных углов позволяет исследовать горизонтальные угловые измерительные системы МКСИ (измеряющие горизонтальную сферическую координату  $\beta$ ) с помощью композитного жезла или лазерного интерферометра, предварительно откалиброванного по длине МКСИ с короткопериодической погрешностью измерений не более  $0,5''$ .

На разработанном вертикальном линейном компараторе трилатерационный метод воспроизведения вертикальных углов позволяет исследовать вертикальные угловые измерительные системы МКСИ, измеряющие вертикальную сферическую угловую координату  $\gamma$  по предварительно откалиброванному по длине МКСИ, выявить (в том числе и короткопериодическую — циклическую) составляющую погрешности измерений вертикальных углов  $\gamma$  в заявленных производителем пределах измерений  $+77^\circ / -52^\circ$  с погрешностью измерений не более  $0,5''$ .

### 4 Выводы

В статье рассмотрены методы повышения точности измерений при обработке результатов измерений пространственных координат. Обработка результатов одних и тех же измерений разными методами позволила проконтролировать эффективность рассмотренных методик с помощью полученных количественных

оценок результатов уменьшения погрешности измерений после введения поправок для компенсации ее систематических составляющих. При этом показано, что использование конкретной методики обработки результатов измерений зависит от поставленной задачи исследований.

**БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Донченко С.И., Денисенко О.В., Сильвестров И.С. и др. Государственный первичный специальный эталон единицы длины ГЭТ 199-2024: обеспечение единства измерений высокоточных тахеометров и их аналогов в режиме трехмерных измерений // Измерительная техника. 2024. № 1. С. 12–18. DOI:10.32446/0368-1025it.2024-1-12-18.
2. Донченко С.И., Мазуркевич А.В., Лесниченко В.И. Метрологически значимое программное обеспечение для оценки точности характеристик наземных лазерных координатно-измерительных систем. Первичная оценка функциональных возможностей // Измерительная техника. 2024. № 12. С. 14–22. DOI:10.32446/0368-1025it.2024-12-14-21.
3. Сильвестров И.С., Печерица Д.С., Мазуркевич А.В. и др. Метрологическое обеспечение координатных и координатно-временных средств измерений в Российской Федерации // Геопрофи. 2023. № 6. С. 8–14.
4. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г. и др. Экспериментальные исследования погрешностей измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами // Метрология. 2014. № 2. С. 17–20.
5. Гура Д.А. Разработка методов исследования электронных тахеометров в условиях производства для оценки и повышения точности измерения горизонтальных углов: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2016. 181 с.
6. Yanggiu Xia, Zhilin Wu, Ming Huang, et al. An improved angle calibration method of a high-precision angle comparator // Metrology and Measurement Systems. 2021. Vol. 28. No. 1. P. 181–190. DOI:10.24425/mms.2021.136001.
7. Кузин А.А., Петров В.В., Пештиев А.А. Геодезическое обеспечение выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа с применением лазерных трекеров // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28. № 1. С. 22–30. DOI:10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.
8. Голыгин Н.Х., Шилин В.А., Осипова Н.С. и др. Метод оценки и устранения влияния эксцентриситетов на компараторе для исследований погрешности измерений горизонтальных углов мобильными координатными средствами измерений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 5. С. 609–614. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-609-614.
9. Кузин А.Ю., Крошкин А.Н., Исаев Л.К. и др. Практические аспекты применения искусственного интеллекта в метрологии // Измерительная техника. 2023. № 9. С. 66–72. DOI:10.32446/0368-1025it.2023-9-66-72.
10. Хиноева О.Б. Новые возможности повышения точности аттестации геодезических приборов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2005. № 5. С. 136–142.
11. Хиноева О.Б. Разработка и применение нейросетевых алгоритмов учета погрешностей эталонных средств при калибровке угломерных геодезических приборов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 136 с.

**АВТОРЫ Голыгин Николай Христофорович**

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

кафедра технологии оптического приборостроения,

факультет оптического приборостроения

канд. техн. наук, доцент

**Лысенко Валерий Григорьевич**

✉ lysenko@vniims.ru

ФБУ «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии — Ростест»,

Москва, Россия

д-р техн. наук, профессор

🆔 0000-0001-7410-7028

**Савиных Виктор Петрович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра аэрокосмических съемок, геодезический факультет  
д-р техн. наук, профессор  
 0000-0002-3259-6721

**Чугреев Игорь Григорьевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра геодезии, геодезический факультет  
д-р техн. наук, профессор

**Шилин Виктор Афанасьевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра оптико-электронных приборов, факультет оптического приборостроения  
канд. техн. наук, доцент

Поступила 07.04.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Methods for improving the accuracy of angular spherical coordinates measurements of mobile coordinate measurement devices

**Nikolay H. Golygin<sup>1</sup>✉, Valery G. Lysenko<sup>2</sup>, Victor P. Savinykh<sup>1</sup>, Igor G. Chugreev<sup>1</sup>, Victor A. Shilin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>2</sup> FBU PM "Rostest", Moscow, Russia

✉ nx\_golygin@mail.ru

**CITATION** Golygin NH, Lysenko VG, Savinykh VP, Chugreev IG, Shilin VA. Methods for improving the accuracy of angular spherical coordinates measurements of mobile coordinate measurement devices. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 187–202. DOI:10.30533/GiA-2025-041.

**KEYWORDS** optical-electronic complex, mobile coordinate measuring instruments, discrete Fourier transform, affine transformations, artificial neural network, eccentricities

**ABSTRACT** This paper describes methods for improving the accuracy of measurements of angular spherical coordinates by mobile coordinate measuring instruments (MKS). Methods of processing research results on an optoelectronic complex related to the metrological support of circular horizontal and vertical measuring systems of the ICSI are presented. The methods of processing the results of research on the error of electronic total stations using discrete Fourier transforms, affine transformations and an artificial neural network have improved the accuracy of measurements of horizontal and vertical angles on an optoelectronic complex for testing, verification and calibration of ICSI. At the same time, it is noted that the use of a specific measurement results processing technique depends on the research objective. It is noted that in the case of orthogonality of the axes of the rotary table and the prism of the horizontal plane, when checking the ICSI, it is sufficient to use the affine transformation method, since here the influence of the eccentricities of the ICSI location above the prism and the prism itself on the rotary table is automatically eliminated. If the research results are not acceptable, then a technique for processing research results using harmonic analysis based on the discrete Fourier transform can be used, which allows you to analyze the measurement results, identify what the measurement errors relate to (comparator or ICSI), after which a decision is made to eliminate the corresponding harmonics (a regression line can be constructed, characterizing the systematic measurement error of the ICSI).

- REFERENCES**
1. Donchenko SI, Denisenko OV, Silvestrov IS, et al. Gosudarstvennyj pervichnyj special'nyj jetalon edinicy dliny GJeT 199-2024: obespechenie edinstva izmerenij vysokotochnnyh taheometrov i ih analogov v rezhime trehmernyh izmerenij [The state primary special standard of the unit of length GET 199-2024: ensuring the uniformity of measurements of high-precision total stations and their analogues in the mode of three-dimensional measurements]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2024;1: 12–18. DOI:10.32446/0368-1025it.2024-1-12-18.
  2. Donchenko SI, Mazurkevich AV, Lesnichenko VI. Metrologicheski znachimoe programmnoe obespechenie dlja ocenki tochnosti harakteristik nazemnyh lazernyh koordinatno-izmeritel'nyh sistem. Pervichnaja ocenka funkcional'nyh vozmozhnostej [Metrologically significant software for evaluating the accuracy of characteristics of ground-based laser coordinate measuring systems. Initial assessment of functionality]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2024;12: 14–22. (In Russian). DOI:10.32446/0368-1025it.2024-12-14-21.
  3. Silvestrov IS, Pecheritsa DS, Mazurkevich AV, et al. Metrologicheskoe obespechenie koordinatnyh i koordinatno-vremennyh sredstv izmerenij v Rossijskoj Federacii [Metrological support of coordinate and time-coordinate measuring instruments in the Russian Federation]. *Geoprofi*. 2023;6: 8–14. (In Russian).
  4. Zheltko ChN, Gura DA, Shevchenko GG, et al. Jeksperimental'nye issledovanija pogreshnostej izmerenij gorizonta'nyh uglov jelektronnymi taheometrami [Experimental studies of measurement errors of horizontal angles by electronic total stations]. *Metrology*. 2014;2: 17–20. (In Russian).
  5. Gura DA. *Razrabotka metodov issledovanija jelektronnyh taheometrov v uslovijah proizvodstva dlja ocenki i povyshenija tochnosti izmerenija gorizonta'nyh uglov* [Development of research methods for electronic total stations in production conditions to evaluate and improve the accuracy of measuring horizontal angles] [dissertation]. Krasnodar; 2016. 181 p. (In Russian).
  6. Yanggiu Xia, Zhilin Wu, Ming Huang, et al. An improved angle calibration method of a high-precision angle comparator. *Metrology and Measurement Systems*. 2021;28(1): 181–190. DOI:10.24425/mms.2021.136001.
  7. Kuzin AA, Petrov VV, Peftiev AA. Geodezicheskoe obespechenie vyverki formy otrazhajushhej poverhnosti glavnogo zerkala radioteleskopa s primeneniem lazernyh trekerov [Geodetic support for the alignment of the shape of the reflecting surface of the main mirror of a radio telescope using laser trackers]. *Vestnik SSUGT*. 2023;28(1): 22–30. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.
  8. Golygin NH, Shilin VA, Osipova NS, et al. Metod ocenki i ustraneniya vlijaniya jekscentrisitetov na komparatore dlja issledovanij pogreshnosti izmerenij gorizonta'nyh uglov mobil'nymi koordinatnymi sredstvami izmerenij [A method for assessing and eliminating the influence of eccentricities on a comparator for studying the measurement error of horizontal angles by mobile coordinate measuring instruments]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(5): 609–614. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-609-614.
  9. Kuzin AYu, Kroshkin AN, Isaev LK, et al. Prakticheskie aspekty primeneniya iskusstvennogo intellekta v metrologii [Practical aspects of the application of artificial intelligence in metrology]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2023;9: 66–72. (In Russian). DOI:10.32446/0368-1025it.2023-9-66-72.
  10. Hinoeva OB. Novye vozmozhnosti povyshenija tochnosti attestacii geodezicheskikh priborov [New opportunities for improving the accuracy of geodetic instrument certification]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2005;5: 136–142. (In Russian).
  11. Hinoeva OB. *Razrabotka i primenenie nejrosetevyh algoritmov ucheta pogreshnostej jetalonnyh sredstv pri kalibrovke uglomernyh geodezicheskikh priborov* [Development and application of neural network algorithms for accounting for errors of reference tools in the calibration of angle-measuring geodetic instruments] [dissertation]. Moscow; 2007. 136 p. (In Russian).

**AUTHORS** **Nikolay H. Golygin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
Department of Optical Instrumentation Technology, Faculty of Optical Instrumentation  
PhD in Engineering, Associate Professor

**Valery G. Lysenko**

✉ lysenko@vniims.ru

Scientific Research Center of Applied Metrology – Rostest, Moscow, Russia

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

ORCID 0000-0001-7410-7028

**Viktor P. Savinykh**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Aerospace Surveying, Faculty of Geodesy

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

ORCID 0000-0002-3259-6721

**Igor G. Chugreev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Geodesy, Faculty of Geodesy

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

**Viktor A. Shilin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Optoelectronic Devices, Faculty of Optical Instrumentation

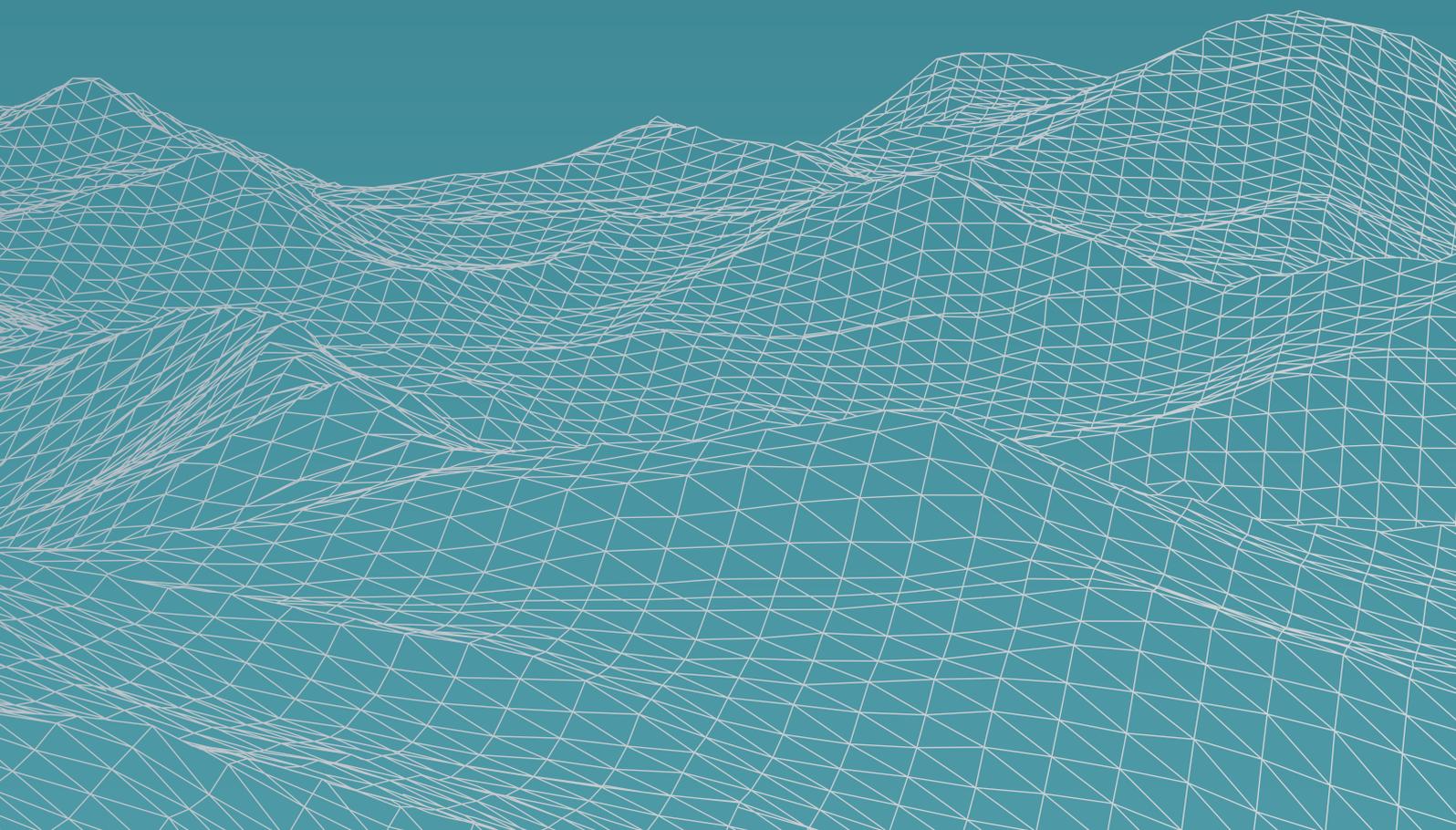
PhD in Engineering, Associate Professor

Submitted: April 07, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.

Международная  
научная онлайн-  
конференция

**П Р О С**  
**Т Р А Н С Т**  
**В Е Н Н Ы Е**  
**данные**

наука и технологии 2025



Секция 1



**Фотоника.  
Опτικο-электронные  
приборы  
и комплексы**

*Научные руководители:*  
И.П. Торшина (д-р техн. наук),  
В.А. Соломатин (д-р техн.  
наук)

*Докладов: 9*

Секция 2



**Геоинформатика**

*Проблемы сбора,  
обработки,  
анализа и защиты  
пространственных  
и пространственно-  
временных данных*

*Научные руководители:*  
А.В. Матерухин (д-р техн.  
наук), О.Г. Гвоздев (канд. техн.  
наук), Н.Д. Лукьяненко

*Докладов: 16*

Секция 3



**Геоинформационное  
картографирование**

*Научный руководитель:*  
О.Н. Николаева (д-р техн.  
наук)

*Докладов: 21*

Секция 4



**Аэрокосмические  
съемки.  
Фотограмметрия**

*Научные руководители:*  
А.Г. Чибуничев (д-р техн.  
наук), Т.Н. Скрипицына (канд.  
техн. наук), А.В. Говоров (канд.  
техн. наук)

*Докладов: 12*

Секция 5



**Мониторинг земель,  
природных ресурсов  
и чрезвычайных  
ситуаций**

*Научный руководитель:*  
В.В. Беленко (д-р техн. наук)

*Докладов: 16*

Секция 6



**Кадастр  
недвижимости,  
землеустройство  
и развитие  
территорий**

*Научные руководители:*  
Т.В. Илюшина (д-р геогр.  
наук), А.М. Тарарин (канд.  
техн. наук)

*Докладов: 21*

Секция 7



**Инженерная  
и космическая  
геодезия**

*Научные руководители:*  
А.О. Куприянов (канд. техн.  
наук), В.И. Крылов (канд. техн.  
наук), Д.Е. Лева

*Докладов: 23*

Секция 8



**Геодезия.  
Системы  
геодезического  
обеспечения**

*Научные руководители:*  
В.В. Ознамец (д-р техн. наук),  
И.М. Кравчук (канд. техн.  
наук)

*Докладов: 19*

Секция 9



**Геоэкология**

*Научные руководители:*  
В.В. Братков (д-р геогр. наук),  
Н.В. Фомина (канд. геогр.  
наук)

*Докладов: 5*

Секция 10



**Международная  
Докладчики  
на английском языке**

*Научные руководители:*  
А.В. Белоцерковский (д-р физ.-  
мат. наук)

*Докладов: 6*

Секция 11



**ГЕОКУБА  
Геоинформационные  
системы и технологии:  
тенденции  
и перспективы**

*Научные руководители:*  
Виктор Эмилио Алуиха Урхэль

*Докладов: 8*

**Международная научная онлайн-конференция** университета МИИГАиК «Пространственные данные: наука и технологии» прошла 28–29 мая 2025 года. В ней приняли участие российские ученые и их коллеги из Албании, Армении, Вьетнама, Мексики и других стран, а также специалисты различных отечественных и зарубежных предприятий. На конференции рассматривались актуальные направления, проблемы и перспективы развития науки и технологий в области пространственных данных.

В своем обращении к участникам и организаторам конференции курирующий научно-исследовательскую деятельность проректор университета МИИГАиК А.В. Белоцерковский, отметив слаженную и содержательную работу секций, подчеркнул, что «даже в онлайн-формате возможно обеспечить продуктивную научную коммуникацию и академическое взаимодействие».

**В рамках конференции** работало 11 секций, на которых было сделано 156 докладов. Международная секция проходила на английском языке, а секция «ГЕОКУБА. Геоинформационные системы и технологии: тенденции и перспективы», посвященная 30-летию юбилею Группы государственных геодезических компаний «Геокуба», одного из главных зарубежных партнеров университета МИИГАиК, — на испанском языке.

В рамках секции «Фотоника. Оптико-электронные приборы и комплексы» рассматривались различные оптические системы: бортовой аппаратуры космического аппарата системы мониторинга околоземного космического пространства; дисплеев дополненной реальности; многоканального инфракрасного радиометра. Освещалась также методология разработки колориметрических оптико-электронных приборов и систем, был представлен расчет оптических схем зеркальных телескопов на основе сферического главного зеркала, рассматривался спектральный канал телескопа системы «Млечный путь».

На секции «Геоинформатика: проблемы сбора, обработки, анализа и защиты пространственных и пространственно-временных данных» были подняты вопросы применения ночных спутниковых изображений для социального мониторинга; задействования искусственного интеллекта для анализа изображений природных объектов на спутниковых снимках; использования поточных крипто-систем, основанных на группах, при передаче геоданных и др.

Не менее интересным оказалось обсуждение проблем, находящихся на стыке геоинформатики и картографии. Так, в рамках конференции были заслушаны доклады о картографировании метеорологических элементов с помощью математических методов, об автоматизированной системе моделирования и визуализации индекса качества городской среды, о нестандартных способах визуализации многомерных геоданных и др.

В докладах, посвященных аэрокосмическим съемкам и фотограмметрии, поднимались вопросы построения трехмерных моделей сетчатых конструкций по фотоснимкам, рассматривалось применение метода двойной корреляции для распознавания объектов по результатам многозональной съемки, изучалась возможность построения ЦМР ледника по слабоконтрастным снимкам, полученным с беспилотного воздушного судна.

Выступления секции «Мониторинг земель, природных ресурсов и чрезвычайных ситуаций» были посвящены российскому опыту дистанционного мониторинга нефтяных загрязнений поверхностных водных объектов, разработке метода прогнозирования изменения землепользования с учетом природных и демографических факторов, а также следующим методикам: обнаружения изменений состава земель по данным многозональной космической съемки; выявления и картографирования захоронений токсичных отходов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса; определения наилучшей комбинации спектральных каналов для выделения конкретного класса ландшафтного покрова и др.

На конференции также освещались проблемы землеустройства, земельного контроля, государственного регулирования земельных отношений, национальной системы пространственных данных (НСПД). Например, в докладах были представлены такие темы, как классификация и идентификация пространственных данных, реестровые ошибки в контексте НСПД, регенеративное землеустройство, применение беспилотных авиационных систем в кадастровой деятельности и т. д.

Одной из самых объемных на конференции стала секция «Инженерная и космическая геодезия». Здесь рассматривались современные методы и технологии выполнения геодезических исследований для инженерных и прикладных задач, использование спутниковых технологий, а также наземного и воздушного лазерного сканирования для геодезии и мониторинга земной поверхности.

Большое количество докладов было посвящено геодезическому обеспечению изыскательских работ с использованием современных методов и средств измерений. Так, были описаны методы измерения гравитационного градиента на цифровых технологиях оптического съема, особенности применения цифровых фотокамер в нивелировании, методика определения коэффициента рефракции по результатам градиентных геодезических измерений и др. Особый интерес вызвал доклад о противоречиях современного геодезического планового обеспечения во Вьетнаме и способах их разрешения.

Секция «Геоэкология» была посвящена пространственно-временному анализу современных проблем окружающей среды. Среди разнообразных тем, которые здесь поднимались, были современное состояние проблемы моделирования светового

загрязнения для целей геоэкологического мониторинга, последствия трансформации границы лесостепной зоны, связь климатических изменений на территории Северного Кавказа с его геоэкологическим потенциалом, конфликт интересов между урбанизацией и сохранением природы в градостроительной политике Московского столичного региона и др.

На международной секции обсуждались, в частности, вопросы применения технологий ДЗЗ для решения таких задач, как мониторинг природных ресурсов, анализ межсезонных колебаний

температуры и влажности почвы и др. В одном из докладов освещалось проведение морских исследований для создания искусственного кораллового рифа в заливе Джуния.

**Успешное проведение Международной** научной онлайн-конференции «Пространственные данные: наука и технологии» стало очередным важным шагом к объединению ученых и экспертов в исследовании и решении проблем, возникающих в настоящее время в области сбора, обработки и анализа пространственных данных. ■

