

ISSN 0536-101X  
e-ISSN 2618-7299

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

Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying

**69 • 04 • 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 • 04 • 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:**  
Журавлева Е.Д.  
**Дизайн-макет:** Леднёва С.В.  
**Верстка:** Леднёва С.В.

**Подписано в печать 29.08.2025.**  
Гарнитура Source Serif Pro.  
Формат 60×90<sup>1/8</sup>.  
Бумага мелованная.  
Печать цифровая.  
Объем 16,5 усл. печ. л.  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 10. 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 29.08.2025.**  
Font Source Serif Pro.  
Format 60×90<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Coated paper.  
Digital print.  
16.5 printed sheet.  
500 copies. Order No. 10.

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

<b>ГЕОДЕЗИЯ</b>	<b>Косарев Н.С.</b> Оценка многолучевости ГНСС-измерений с помощью программного продукта открытого доступа	<b>8</b>
	<b>Конюхов М.А., Воейко О.А.</b> Перспективный метод проверки нивелиров различных групп точности перед выполнением геодезических работ	<b>21</b>
<b>АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ</b>	<b>Попов Н.В., Малинников В.А., Нахутин А.И.</b> Связь спектрональных данных Sentinel-2 с наземными измерениями концентраций метана и метеопараметрами атмосферы в летний период	<b>30</b>
	<b>Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Щавелев А.Н.</b> Особенности регионального распределения парниковых газов в зависимости от ландшафтно-географических факторов по материалам космической съемки (на примере Чеченской Республики)	<b>45</b>
	<b>Щеглов М.А., Павловский А.А., Карелов А.И., Мильштейн С.И.</b> Выявление ряда опасных процессов, угрожающих железнодорожной инфраструктуре на Байкало-Амурской магистрали, на основании данных беспилотных авиационных систем	<b>59</b>
<b>ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ</b>	<b>Бельшева Ю.В., Гвоздев О.Г., Матерухин А.В.</b> Концепция пространственно-временных явлений	<b>70</b>
	<b>Саидов А.Г., Жуков Д.В.</b> Особенности применения нейронных сетей при распознавании антропогенных объектов с вариативными контурами	<b>83</b>
<b>ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ</b>	<b>Байгобылов Д.В., Литвиненко М.В.</b> Проблема сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости: анализ текущих исследований	<b>96</b>
	<b>Гура Д.А.</b> Применение BIM-технологий для автоматизированной трехмерной идентификации объектов недвижимости	<b>110</b>
<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ</b>	<b>Охрименко А.А., Кретушев А.В.</b> Применение метода динамической фазовой интерферометрии для исследования динамических процессов биообъектов	<b>123</b>

<b>GEODESY</b>	<b>Kosarev N.S.</b> Assessment of GNSS multipath effects using open source software	<b>8</b>
	<b>Konyukhov M.A., Voeyko O.A.</b> A future checking method of various accuracy levels before surveying	<b>21</b>
<b>EARTH AEROSPACE SURVEY, PHOTOGRAMMETRY</b>	<b>Popov N.V., Malinnikov V.A., Nakhutin A.I.</b> Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations in summer	<b>30</b>
	<b>Myachina K.V., Kerimov I.A., Ryakhov R.V., Shchhavelev A.N.</b> Greenhouse gases regional distribution depending on landscape and geographical features based on space survey materials (Chechen Republic as the example)	<b>45</b>
	<b>Scheglov M.A., Pavlovsky A.A., Karelov A.I., Milstein S.I.</b> Identification of a number of hazardous processes threatening railway infrastructure on the Baikal-Amur Mainline based on data from unmanned aerial systems	<b>59</b>
<b>GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY</b>	<b>Belysheva Yu.V., Gvozdev O.G., Materukhin A.V.</b> The concept of spatio-temporal phenomena	<b>70</b>
	<b>Saidov A.G., Zhukov D.V.</b> Features of neural network application in recognizing anthropogenic objects with variable contours	<b>83</b>
<b>LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING</b>	<b>Baigobylov D.V., Litvinenko M.V.</b> The problem of preserving the type of permitted use of real estate: analysis of current research	<b>96</b>
	<b>Gura D.A.</b> Application of BIM technology for automated 3D identification of real estate objects	<b>110</b>
<b>OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS</b>	<b>Okhrimenko A.A., Kretushev A.V.</b> Application of the dynamic phase interferometry method to study the dynamic processes of biological objects	<b>123</b>



# Оценка многолучевости ГНСС-измерений с помощью программного продукта открытого доступа

**Н.С. Косарев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
Новосибирск, Россия  
 kosarevnsk@yandex.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Косарев Н.С. Оценка многолучевости ГНСС-измерений с помощью программного продукта открытого доступа // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 8–20. DOI:10.30533/GiA-2025-035.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** многолучевость, ГНСС-измерения, автоматизированная система спутникового мониторинга, RINGO, критерии оценки многолучевости, Международная ГНСС-служба

**АННОТАЦИЯ** В статье выполнена оценка многолучевости измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с помощью программного продукта RINGO по данным автоматизированной системы геодезического мониторинга одной из высоконапорных гидроэлектростанций Российской Федерации. Выявленные на станциях значения многолучевости оценены по критериям, рекомендованным Международной ГНСС-службой (МГС). По результатам сравнения установлено, что все опорные станции автоматизированной системы геодезического мониторинга соответствуют рекомендованным критериям МГС. Из семи мониторинговых пунктов только один отвечает критериям оценки многолучевости, а на двух выявлены недопустимые значения. Возможной причиной низкого качества спутниковых измерений могут быть препятствия вблизи этих станций, закрывающие радиогоризонт антенны, прерывающие или переотражающие сигналы ГНСС. Рекомендовано в структуру автоматизированной системы геодезического мониторинга включить процедуру предварительного анализа ГНСС-измерений, позволяющего выявить в деформационной сети места, нежелательные для размещения станций, а также при необходимости исключить из последующего анализа координаты мониторинговых пунктов, измерения с которых подвержены сильному влиянию многолучевости. Необходимо также выполнить предварительный анализ ГНСС-измерений на пунктах дифференциальных геодезических станций с целью проверки по критериям МГС, в результате которой данные станции могут быть включены в современную структуру государственной геодезической сети.

## 1 Введение

Эффект многолучевого распространения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возникает во время приема ГНСС-антенной одновременно прямого сигнала спутника и сигнала, отраженного от окружающих ее поверхностей [1, 2]. Таким образом, многолучевость зависит от взаимного положения «спутник — приемник», и величина ошибки в определении положения при неизменном окружении антенны медленно изменяется в течение сеанса измерений. Величина многолучевости также различна для кодовых и фазовых измерений.

При позиционировании по кодовым псевдодалностям (абсолютный или дифференциальный методы) значение многопутности доходит до половины длины чипа, т. е. 150 м для грубого кода и 15 м для точного кода, хотя обычно ошибки намного меньше — около 10 м [3, 4]. Существенно уменьшить вклад ошибки от многолучевости в кодовых измерениях позволяет усреднение результатов за некоторый период времени [5].

Для фазовых псевдодалностей величина многопутности составляет  $\frac{1}{4}$  длины волны, что в линейной мере для частоты  $L1$  системы GPS (*англ.* Global Positioning System) равно примерно 5–6 см [3, 4]. В случае позиционирования по фазе несущей продолжительные сеансы будут уменьшать влияние многолучевости в окончательных результатах базовой линии [5].

Кроме того, величина многолучевости для спутников GPS обычно повторяется каждые звездные сутки, т. е. каждые следующие сутки на 236 секунд раньше. У спутников ГЛОНАСС геометрия повторяется через 17 витков (7 суток 23 часа 27 минут 27 секунд) [6].

Для уменьшения влияния многолучевости на измерения разработан ряд рекомендаций: размещать ГНСС-антенны в местах с открытым радиогоризонтом, использовать ГНСС-антенны специальных конструкций, разрабатывать уменьшающие или исключаяющие этот эффект линейные комбинации измерений, использовать алгоритмы фильтрации измеренных псевдодалностей [7–9].

Для вычисления величины многолучевости на отдельной станции не существует общей математической модели, однако влияние многолучевости на измеренные расстояния до спутников можно оценить комбинацией кодовых и фазовых псевдодалностей [10, 11] или по фазовым разностям через звездные сутки [6]. Другой подход к оценке многолучевости — создание специальных стендов, имитирующих переотраженные ГНСС-сигналы [12].

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Постановка задачи исследования и выбор программного продукта для ее решения

В настоящее время автоматизированные системы геодезического мониторинга (АСГМ) активно применяются для обеспечения безопасности критических объектов инфраструктуры Российской Федерации. В этих целях используется классическая технология, когда опорные станции устанавливаются на стабильном основании, вне зоны деформаций исследуемого объекта, а мониторинговые станции размещаются в местах ожидаемого наибольшего влияния деформаций, определенных проектными или эксплуатирующими организациями [13, 14]. Нередко эти места характеризуются частично закрытым радиогоризонтом: технологические конструкции или окружающий рельеф блокируют прохождение сигналов ГНСС или отражают их, что в конечном итоге приводит к ошибкам определения координат.

В этой связи на этапе проектирования спутниковой сети АСГМ в местах потенциального размещения опорных и мониторинговых станций следует выполнять тестовые измерения продолжительностью не менее суток, а затем оценивать величину многолучевости. Это позволит выявить в деформационной сети места, нежелательные для размещения станций, а также при необходимости исключить из последующего анализа координаты мониторинговых пунктов, измерения с которых подвержены сильному влиянию многолучевости.

На этапе эксплуатации уже действующей АСГМ следует разработать методике предварительного оценивания величины многолучевости на отдельных станциях, а также выполнять фильтрацию кодовых и фазовых псевдодалностей для исключения из измерений данных, которые вносят ошибку в определение координат. Поэтому основной задачей, поставленной автором в данном исследовании, является обоснование необходимости предварительного анализа ГНСС-данных для определения величины многолучевости и выбор программного продукта для этой оценки.

Согласно рекомендациям Международной ГНСС-службы (МГС) [15], выделяют три критерия для оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений.

**Таблица 1** ⬇

Критерии оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений

**Table 1**

Criteria for assessing GNSS code multipath

Критерий	СКО усредненного значения кодовой многолучевости, м	
	для частоты L1	для частоты L2
REC	0,30	0,30
RF1	0,40	0,60
RF2	0,50	0,75

**Примечание.** СКО — средняя квадратическая ошибка.

Критерий REC определяется рекомендуемыми руководящими документами МГС относительно качества данных, применимыми как к активным станциям, так и к предлагаемым станциям. Критерий RF1 является критерием качества на более чем половине станций МГС, а критерий RF2 — на двух третях станций [15]. В табл. 1 приведены количественные характеристики каждого критерия.

Определение величины многолучевости ГНСС-измерений реализовано несколькими исследовательскими коллективами в утилитах предварительной обработки данных, таких как TEQC<sup>1</sup>, GFZRNX<sup>2</sup>, G-Nut/Anubis, GDP, GDPS, RINGO [16–21]. В табл. 2 приведено сравнение возможностей этих программных продуктов.

**Таблица 2** ⬇

Сравнительные характеристики инструментов / утилит предварительной обработки

**Table 2**

Comparative characteristics of pre-processing tools / utilities

Название программного продукта	Функциональные возможности					
	Поддержка версии RINEX			Редактирование данных	Оценка качества измерений (многолучевость, потери счета циклов и др.)	Графический интерфейс
	2.x	3.x	4.00			
TEQC	+	–	–	+	+	–
GFZRNX	+	+	+	+	+	–
G-Nut/Anubis	+	+	–	+	+	–
GDP	+	+	–	+	*	**
GDPS	+	+	+	+	+	+
RINGO	+	+	+	+	+	**

**Примечание.** Знаком \* обозначается ограниченный функционал, знаком \*\* — поддержка вывода результатов в различных видах.

В результате сравнения функциональных возможностей программных продуктов в качестве инструмента процедуры оценки многолучевости ГНСС-измерений выбран программный продукт RINGO.

1 Estey L., Meertens C. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data // GPS Solutions. 1999. Vol. 3. P. 42–49.

2 Nischan T. GFZRNX – RINEX GNSS data conversion and manipulation toolbox. Version 1.05. 2016. 45 p.

## 2.2 Описание программного продукта RINGO

Программный продукт RINGO разработан коллективом авторов Управления геопространственной информации Японии для предварительной обработки мультиспектральных ГНСС-данных и находится в открытом доступе<sup>3</sup>.

Данный программный продукт позволяет [21]:

- редактировать RINEX-файлы (объединение файлов, редактирование заголовка, прореживание данных);
- осуществлять проверку качества измерений;
- определять поправку часов ГНСС-приемника;
- выявлять потери счета циклов;
- вычислять ионосферную задержку первого и второго порядка;
- конвертировать файлы BINEX и RTCM в RINEX;
- поддерживать выдачу результатов в интерактивной форме в виде HTML-страницы.

Программный продукт RINGO написан на языке программирования GO и работает в режиме командной строки. Использование данного языка программирования позволяет программному продукту быть совместимым с различными операционными системами, такими как UNIX, Linux, Windows и MacOS, без какой-либо модификации исходного кода.

В настоящее время программное обеспечение RINGO поддерживает версии RINEX 2.xx, 3.0x и 4.00, а также сжатые файлы RINEX, включая сжатие UNIX (.Z), сжатие gzip (.gz), сжатие bzip2 (.bz2) и tar-архивированный файл навигации RINEX (.tar, .tar.Z, .tar.gz и .tar.bz2) для прямого чтения. В табл. 3 приведены типы поддерживаемых файлов.

**Таблица 3** ➤

Типы поддерживаемых файлов в программном продукте RINGO

**Table 3**

Types of supported files in the RINGO software

Тип файла	Версия файла	Тип данных
RINEX	RINEX 2.xx, 3.0x и 4.00	2.10, 2.11, 2.12, 3.00, 3.01, 3.02, 3.03, 3.04, 3.05, 4.00
BINEX	Большой порядок байтов, прямой BINEX	<i>Навигационные данные</i> 0×01–0×01: Эфемериды системы GPS 0×01–0×02: Эфемериды системы ГЛОНАСС 0×01–0×03: Эфемериды системы SBAS 0×01–0×06: Эфемериды системы QZSS 0×01–0×14: Эфемериды системы GALILEO 0 × 7f: ГНСС-наблюдения
RTCM	RTCM10403.3	<i>Навигационные данные:</i> 1019: Эфемериды системы GPS 1020: Эфемериды системы ГЛОНАСС 1044: Эфемериды системы QZSS 1046: Эфемериды системы GALILEO  <i>Данные ГНСС-измерений:</i> MSM7 (1077, 1087, 1097, 1117)

Для оценки многолучевости в программном продукте используется линейная комбинация кодовых и фазовых псевдодалностей, имеющая следующий вид [22, 23]:

$$MP_{ij} = P_i - L_i - \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} (L_i - L_j),$$

где  $P_i$  — кодовая псевдодалность на несущей частоте  $f_i$ ;

$L_i$  — фазовая псевдодалность на несущей частоте  $f_i$ ;

$f_i$  и  $f_j$  — несущая частота  $i$  и  $j$  сигналов ГНСС.

В линейной комбинации (1) присутствуют не только кодовая многолучевость и шум, но также фазовая многолучевость и шум фазы несущей, фазовая

3 RINGO: RINEX pre-processing tool using Go. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://terras.gsi.go.jp/software/ringo/en> (дата обращения: 15.03.2025).

неоднозначность  $N$  и аппаратные задержки. Фазовая многолучевость и шум фазы несущей намного меньше, чем кодовая многолучевость и шум псевдодалности, поэтому фазовую многолучевость и шум фазы несущей можно игнорировать.

Для устранения фазовой неоднозначности  $N$  и аппаратных задержек из уравнения (1) выполняется усреднение данных во времени на дуге орбиты спутника [24]:

2 ➤ 
$$mp_{ij} = MP_{ij} - \frac{\sum_{t=1}^{t=m} MP_{ij}}{m},$$

где  $m$  – временной отрезок, на котором осуществляется усреднение данных.

В программном продукте RINGO усреднение данных во времени, по сути, является скользящим средним, и окно выборки  $N$  составляет 50 значений.

По результатам предварительного анализа RINEX-файла в отчете по оценке качества ГНСС-измерений приводится СКО величины  $mp_{ij}$  для каждого спутника, а также ее усредненное значение

3 ➤ 
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [(mp_{ij})_k - (mp_{ij})_{cp}]^2}{n-1}},$$

где  $(mp_{ij})_{cp}$  – среднее значение величины  $mp_{ij}$ .

### 2.3 Исходные данные для предварительного анализа многолучевости

Оценка многолучевости спутниковых измерений с помощью программного продукта RINGO производилась на данных, собранных автором в процессе метрологической поверки ГНСС-приемников [25] АСГМ одной из высоконапорных ГЭС Российской Федерации (рис. 1). На ГЭС развернута АСГМ на базе ГНСС-технологий, состоящая из десяти станций: 7 станций размещены на гребне плотины, а 3 – на бортах русла реки [26]. Установлено ГНСС-оборудование фирмы Leica Geosystems: на гребне плотины – ГНСС-приемники Leica GMX902 GG с ГНСС-антенной LEIAR10, а на бортах русла реки – ГНСС-приемники Leica GR10 с антенной LEIAR25 (рис. 2).

Всего в рамках метрологической поверки были собраны суточные ГНСС-измерения с общей продолжительностью две недели на каждой станции. Дискретность данных составляла 30 секунд.

Рис. 1 ⬇  
Общий вид высоконапорной ГЭС РФ [26]

Fig. 1  
General view of a high-head hydroelectric power plant in the Russian Federation [26]



Рис. 2 ⬇  
Базовая станция «10-й пост» [26]

Fig. 2  
The base station “10th Post” [26]



### 3 Результаты и обсуждение

Собранные суточные ГНСС-измерения с общей продолжительностью две недели на каждой станции были обработаны с помощью программного продукта RINGO. В табл. 4 представлены результаты статистической оценки кодовой многолучевости, наблюдаемые на каждой станции АСГМ, а в табл. 5 показаны результаты анализа соответствия критериям оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений, определенным МГС, каждой станции АСГМ высоконапорной ГЭС.

**Таблица 4** ➤

Результаты статистической оценки кодовой многолучевости на каждой станции АСГМ, м

**Table 4**

Results of statistical assessment of code multipath at each ASGM station, meters

Пункт	Кодовая многолучевость					
	$mp_{12}$			$mp_{21}$		
	min	max	mean	min	max	mean
BSBV	0,044	0,092	0,062	0,052	0,112	0,079
B10P	0,118	0,135	0,127	0,122	0,137	0,132
BSLU	0,086	0,096	0,091	0,078	0,098	0,089
S10g	0,449	0,755	0,532	0,463	0,742	0,532
S18g	0,407	0,441	0,419	0,389	0,422	0,404
S25g	0,382	0,437	0,402	0,344	0,400	0,376
S33g	0,366	0,487	0,389	0,319	0,498	0,369
S39g	0,372	0,719	0,602	0,363	0,759	0,619
S45g	0,388	0,400	0,392	0,371	0,437	0,399
S55g	0,215	0,226	0,222	0,215	0,265	0,233

**Примечание.** Для значений оценки кодовой многолучевости приняты следующие обозначения: **min** – минимальное, **max** – максимальное, **mean** – среднее.

**Таблица 5** ➤

Процент соответствия критериям оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений для каждой станции АСГМ

**Table 5**

Percentage of compliance with the criteria for assessing GNSS code multipath for each ASGM station

Пункт	Кодовая многолучевость					
	$mp_{12}$			$mp_{21}$		
	REC	RF1	RF2	REC	RF1	RF2
BSBV	100	100	100	100	100	100
B10P	100	100	100	100	100	100
BSLU	100	100	100	100	100	100
S10g	0	0	47	0	73	93
S18g	0	0	100	0	100	100
S25g	0	67	100	0	100	100
S33g	0	87	100	0	100	100
S39g	0	7	13	0	47	67
S45g	0	100	100	0	100	100
S55g	100	100	100	100	100	100

Из табл. 4 и 5 можно сделать следующие выводы:

1. На всех опорных станциях АСГМ BSBV, B10P, BSLU оцененные величины кодовой многолучевости ГНСС-измерений соответствуют всем рекомендуемым критериям REC, RF1 и RF2. Максимальная СКО величины кодовой многолучевости наблюдается на пункте B10P и составляет 0,137 м.
2. На мониторинговых пунктах АСГМ только пункт S55g отвечает всем рекомендуемым критериям REC, RF1 и RF2, максимальная СКО величины кодовой многолучевости составляет 0,265 м.

- Из десяти мониторинговых пунктов только восемь удовлетворяют критерию RF2, на которых среднее значение СКО величины кодовой многолучевости равно приблизительно 0,4 м.
- Две мониторинговые станции S10g и S39g не отвечают всем рекомендуемым критериям REC, RF1 и RF2. Это может объясняться тем, что вблизи этих станций имеются препятствия, ухудшающие качество приема сигналов ГНСС-антенной.

На рис. 3–5 представлены результаты оценки многолучевости по формуле (2) для опорного пункта BSBV, соответствующего всем рекомендуемым критериям МГС, и для мониторинговых станций S10g и S39g, не отвечающих всем рекомендуемым критериям МГС.

Для оценки многолучевости ГНСС-измерений АСГМ дополнительно был использован критерий, определяющий процентную долю пунктов в сети, на которых СКО величины кодовой многолучевости не должна превышать 0,5 м на частотах L1 и L2 [27]. Если величина составляет более 85 %, то такая ГНСС-сеть (в частности, деформационная сеть ГЭС) может расцениваться как устойчивая к влиянию погрешности, вызванной эффектом многопутности. В рассматриваемом случае величина составляет 80 %, и сеть не может считаться таковой. Стоит отметить, что даже не все пункты Фундаментальной астрономо-геодезической сети, составляющие опорную основу Российской Федерации, удовлетворяют этому критерию [28].

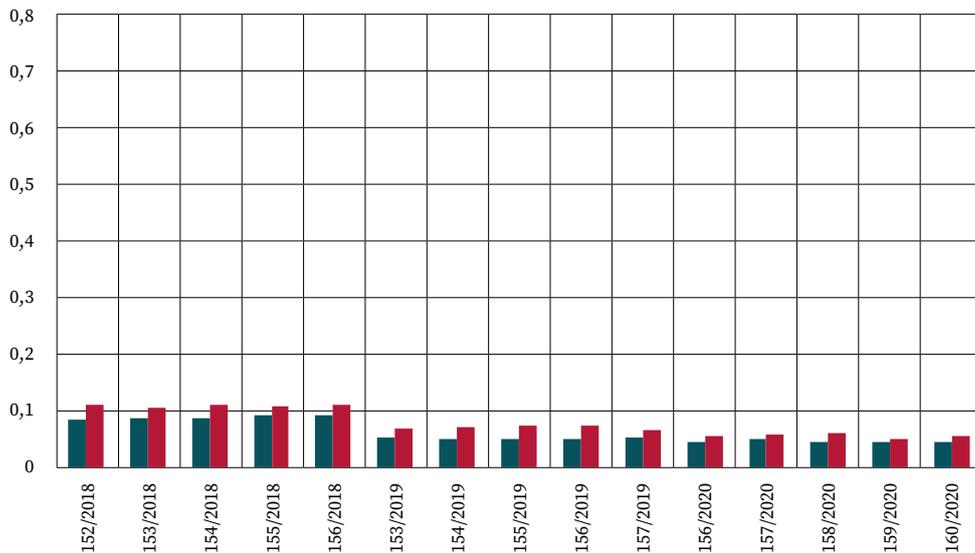
**Рис. 3**  Результаты оценки многолучевости для пункта BSBV

**Fig. 3** Results of multipath assessment for BSBV monitoring point

**Условные обозначения**

-  СКО усредненного значения величины  $mp_{12}$  в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L1
-  СКО усредненного значения величины  $mp_{21}$  в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L2

156/2019 день от начала года / год, на который были получены ГНСС-измерения



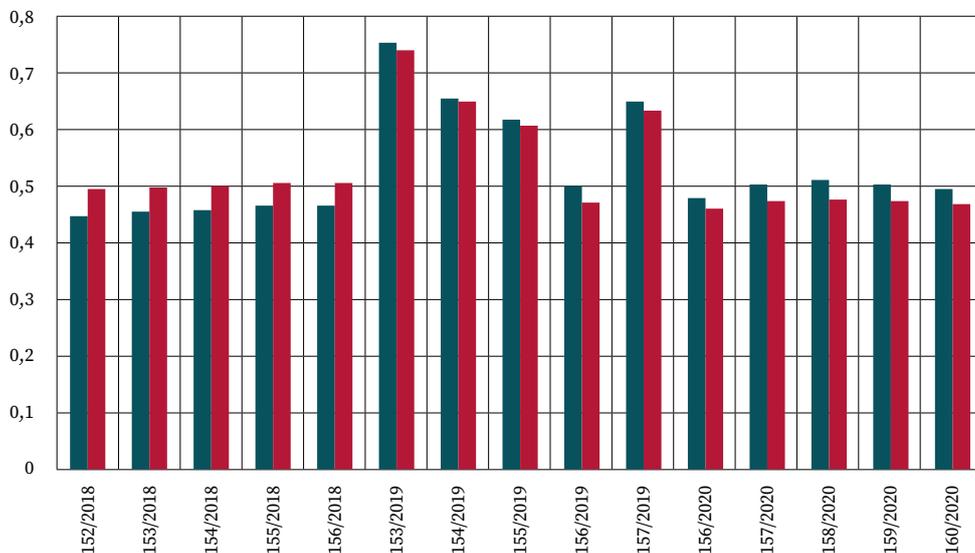
**Рис. 4**  Результаты оценки многолучевости для пункта S10g

**Fig. 4** Results of multipath assessment for S10g monitoring point

**Условные обозначения**

-  СКО усредненного значения величины  $mp_{12}$  в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L1
-  СКО усредненного значения величины  $mp_{21}$  в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L2

156/2019 день от начала года / год, на который были получены ГНСС-измерения



**Рис. 5** 

Результаты оценки многолучевости для пункта S39g

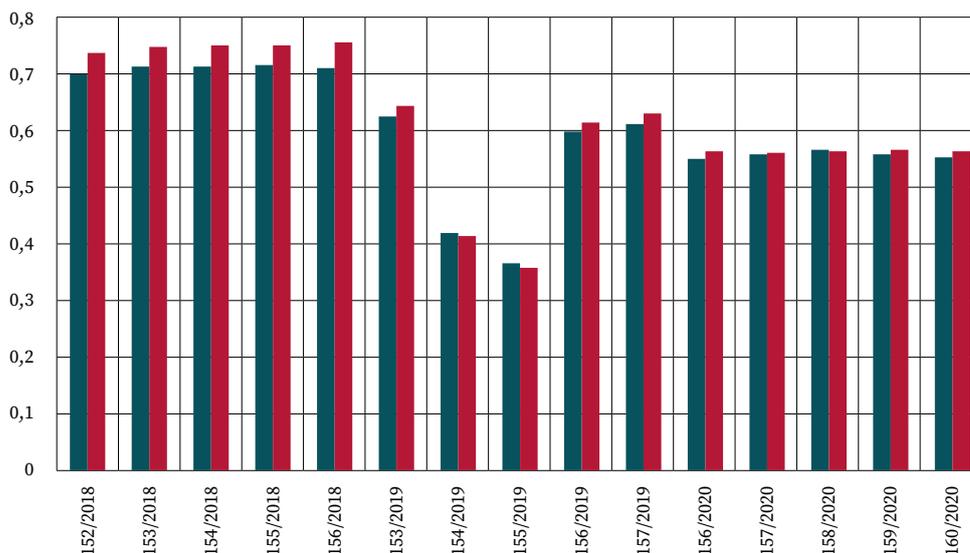
**Fig. 5**

Results of multipath assessment for S39g monitoring point

**Условные обозначения**

-  СКО усредненного значения величины  $mp_{12}$  в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L1
-  СКО усредненного значения величины  $mp_{21}$  в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L2

156/2019 день от начала года / год, на который были получены ГНСС-измерения



## 4 Выводы

В статье выполнена оценка многолучевости спутниковых измерений с помощью программного продукта RINGO на данных, собранных автором в процессе метрологической поверки ГНСС-приемников АСГМ одной из высоконапорных ГЭС Российской Федерации. Полученные результаты сравнивались с критериями оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений, определенными МГС. По результатам сравнения было установлено, что все опорные станции АСГМ BSBV, B10P, BSLU соответствуют рекомендуемым критериям, которые декларированы МГС, а среди мониторинговых пунктов АСГМ только пункт S55g отвечает всем критериям. На двух мониторинговых пунктах (S10g и S39g) из семи оценка многолучевости спутниковых измерений не отвечает рекомендуемым критериям. Это может объясняться тем, что вблизи указанных станций имеются препятствия, ухудшающие качество приема сигналов ГНСС-антенной.

Другим критерием для оценки многолучевости спутниковых измерений выступала процентная доля пунктов в сети со значениями СКО величины кодовой многолучевости  $mp_{12}$  и  $mp_{21}$ , не превышающими 0,5 м. Эта доля должна составлять более 85 %. Согласно результатам исследования, для автоматизированной системы спутникового мониторинга высоконапорной ГЭС РФ рассматриваемая величина равна 80 %. Это также можно объяснить тем, что вблизи данных станций имеются препятствия, ухудшающие качество приема сигналов ГНСС-антенной.

Полученные результаты показывают, что следует включать в структуру АСГМ процедуру предварительного анализа ГНСС-измерений. Это позволит выявить в деформационной сети слабые места, а также при необходимости исключить из последующего анализа координаты мониторинговых пунктов, измерения с которых подвержены сильному влиянию многолучевости.

Рекомендуется также выполнить предварительный анализ ГНСС-измерений на пунктах дифференциальных геодезических станций с целью их проверки по критериям МГС, по результатам которой они могут быть включены в современную структуру государственной геодезической сети.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий Елене Константиновне Лагутиной за полезные замечания и советы, улучшившие содержание данной статьи.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (eds.). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing AG, 2017. 1272 p.

2. Misra P.N., Enge P. Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance. Lincoln: Ganga-Jamuna Press, 2001. 390 p.
3. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. New York: A Willey-Interscience Publication, 2015. 806 p.
4. Kosarev N.S., Antonovich K.M., Lipatnikov L.A. The method of cycle-slip detection and repair GNSS measurements by using receiver with high stability frequency oscillator // Contributions to Geophysics and Geodesy. 2019. Vol. 49. No. 3. P. 283–301. DOI:10.2478/congeo-2019-0015.
5. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картогеоцентр, 2006. Т. 2. 360 с.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картогеоцентр, 2005. Т. 1. 334 с.
7. Татарников Д.В., Астахов А.В., Степаненко А.П. и др. Антенные технологии высокоточного спутникового позиционирования // Антенны. 2016. № 10 (230). С. 77–89.
8. Вейцель А.В., Жодзишский М.И., Милютин Д.С. Ошибки многолучевости для различных спутниковых сигналов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 8. С. 34–41.
9. Lau L. Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements // GPS Solutions. 2025. Vol. 29. P. 42. DOI:10.1007/s10291-024-01801-9.
10. Куприянов А.О., Нейман Ю.М., Морозов Д.А. и др. Разработка алгоритма анализа переотражений навигационного сигнала для изучения влияния многолучевости на ГНСС-измерения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2017. № 6. С. 41–44.
11. Куприянов А.О., Морозов Д.А., Перминов А.Ю. Методика численного определения влияния многолучевости на кодовые и фазовые измерения по сигналам ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64, № 4. С. 391–398. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-391-398.
12. Перминов А.Ю., Морозов Д.А., Куприянов А.О. Экспериментальная апробация методики определения влияния многолучевости на кодовые и фазовые измерения по сигналам ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66, № 5. С. 6–13. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-6-13.
13. Кафтан В.И., Устинов А.В. Применение глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2012. № 12. С. 11–19.
14. Устинов А.В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2014. № 6. С. 39–43.
15. García-Armenteros J.A. Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals // Geodesy and Geodynamics. 2024. Vol. 15. No. 2. P. 189–199. DOI:10.1016/j.geog.2023.07.006.
16. Galdyn F., Zajdel R., Sośnica K. RINEXAV: GNSS global network selection open-source software based on qualitative analysis of RINEX files // SoftwareX. 2023. Vol. 22. P. 101372. DOI:10.1016/j.softx.2023.101372.
17. Bălă A.C., Drăgulescu B.C., Brebu F.-M. Analyzing Rinex data files using the Python programming language // Journal of applied engineering sciences. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 167–177. DOI:10.2478/jaes-2024-0021.
18. Václavovic P., Dousa J. G-Nut/Anubis – open-source tool for multi-GNSS data monitoring // International Association of Geodesy Symposia. 2015. Vol. 143. P. 775–782. DOI:10.1007/1345\_2015\_97.
19. Chen Z., Cui Y., Li L., et al. GDP: an open-source GNSS data preprocessing toolkit // GPS Solutions. 2020. Vol. 24. P. 87. DOI:10.1007/s10291-020-01003-z.
20. Lu L., Hu W., Wu T. GDPS: an open-source python-based software package for multi-GNSS data preprocessing // GPS Solutions. 2024. Vol. 28. P. 138. DOI:10.1007/s10291-024-01678-8.

21. Kawamoto S., Takamatsu N., Abe S. RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data // *Earth, Planets and Space*. 2023. Vol. 75. P. 54. DOI:10.1186/s40623-023-01811-w.
22. Shi C., Zhao Q., Hu Z. Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites // *GPS Solutions*. 2013. Vol. 17. No. 1. P. 103–119. DOI:10.1007/s10291-012-0264-x.
23. Wang G., de Jong K., Zhao Q., et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites // *GPS Solutions*. 2015. Vol. 19. P. 129–139. DOI:10.1007/s10291-014-0374-8.
24. Abou Galala M., Kaloop M.R., Rabah M.M., et al. Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination // *Journal of Surveying Engineering*. 2018. Vol. 144. P. 04018002. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250.
25. Карпик А.П., Косарев Н.С., Антонович К.М. и др. Методика метрологической поверки ГНСС приемников системы мониторинга высоконапорной ГЭС // *Вестник СГУГиТ*. 2019. Т. 24, № 4. С. 34–43.
26. Бернд Х., Сухов И.В., Ли В.Т. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидротехника*. 2015. № 2. С. 12–15.
27. Yaxuan H., Lin Ch., Xiong W. Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China // *Geodesy and Geodynamics*. 2016. Vol. 7. No. 2. P. 87–94. DOI:10.1016/j.geog.2016.03.008.
28. Терещенко В.Е. Анализ качества спутниковых измерений с помощью программной утилиты TEQC // *Вестник СГУГиТ*. 2020. Т. 25, № 3. С. 72–88. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-3-72-88.

**АВТОР** **Косарев Николай Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,  
Новосибирск, Россия  
кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела,  
факультет геодезии и менеджмента  
канд. техн. наук, доцент  
 0000-0003-1806-3651

Поступила 21.03.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликована 29.08.2025.



# Assessment of GNSS multipath effects using open source software

**Nikolai S. Kosarev**<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 kosarevnsk@yandex.ru

**CITATION** Kosarev NS. Assessment of GNSS multipath effects using open source software. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 8–20. DOI:10.30533/GiA-2025-035.

**KEYWORDS** multipath, GNSS measurements, automated satellite monitoring system, RINGO, criteria for assessing multipath, International GNSS Service

**ABSTRACT** The article evaluates the multipath effect in GNSS measurements using the RINGO software based on data from an automated geodetic monitoring system of one of the high-pressure hydroelectric power plants in the Russian Federation. The identified multipath values at the stations were assessed according to the criteria recommended by the International GNSS Service (IGS). The comparison results revealed that all reference stations of the automated geodetic monitoring system meet the IGS recommended criteria. Out of seven monitoring points, only one satisfies the multipath evaluation criteria, while two points exhibit unacceptable values. The possible cause of the low quality of satellite measurements at these stations could be obstacles near the stations that block the antenna's radio horizon, interrupt, or reflect GNSS signals. It is recommended to include a preliminary analysis of GNSS measurements in the structure of the automated geodetic monitoring system. This analysis would help identify unsuitable locations for station placement in the deformation network and, if necessary, exclude the coordinates of monitoring points affected by significant multipath interference from further analysis. Additionally, it is recommended to conduct a preliminary analysis of GNSS measurements at differential geodetic stations to verify their compliance with IGS criteria. Based on this analysis, they could be integrated into the current structure of the State Geodetic Network.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The author expresses gratitude to Elena Konstantinovna Lagutina, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Siberian State University of Geosystems and Technologies, for her valuable comments and suggestions that improved the content of this article.

- REFERENCES**
1. Teunissen PJG, Montenbruck O (eds.) *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing AG; 2017. 1272 p.
  2. Misra PN, Enge P. *Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance*. Lincoln: Ganga-Jamuna Press; 2001. 390 p.
  3. Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. *GPS Satellite Surveying*. New York: A Willey-Interscience Publication; 2015. 806 p.
  4. Kosarev NS, Antonovich KM, Lipatnikov LA. The method of cycle-slip detection and repair GNSS measurements by using receiver with high stability frequency oscillator. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2019;49(3): 283–301. DOI:10.2478/congeo-2019-0015.
  5. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii* [Use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow: Kartgeocenter; 2006. 360 p. (In Russian).
  6. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii* [Use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: Kartgeocenter; 2005. 334 p. (In Russian).
  7. Tatarnikov DV, Astakhov AV, Stepanenko AP, et al. Antennyye tehnologii vysokotochnogo sputnikovogo pozicionirovaniya [Antenna technologies for high precision GNSS positioning]. *Journal Antennas*. 2016;10(230): 77–89. (In Russian).
  8. Weitzel AV, Zhodzishsky MI, Milyutin DS. Oshibki mnogoluchevosti dlja razlichnyh sputnikovyyh signalov [Multipath errors of various satellite signals]. *Information-measuring and control systems*. 2009;8: 34–41. (In Russian).
  9. Lau L. Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements. *GPS Solutions*. 2025;29: 42. DOI:10.1007/s10291-024-01801-9.
  10. Kupriyanov AO, Neumann YuM, Morozov DA, et al. Razrabotka algoritma analiza pereotrazhenij navigacionnogo signala dlja izuchenija vlijaniya mnogoluchevosti na GNSS-izmereniya [Design of an algorithm for the analysis of reflections of a navigation signal to study the effect of multipath on GNSS measurements]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2017;61(6): 41–44. (In Russian).
  11. Kupriyanov AO, Morozov DA, Perminov AYu. Metodika chislennogo opredeleniya vlijaniya mnogoluchevosti na kodovye i fazovye izmereniya po signalam GNSS [Methodology for numerical determination of the multipath interference on code and phase measurements from GNSS signals]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(4): 391–398. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-391-398.
  12. Perminov AYu, Morozov DA, Kupriyanov AO. Jeksperimental'naja aprobacija metodiki opredeleniya vlijaniya mnogoluchevosti na kodovye i fazovye izmereniya po signalam GNSS [Experimental testing of the method for determining the effect of multipath on code and phase measurements from GNSS signals]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(5): 6–13. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-6-13.
  13. Kaftan VI, Ustinov AV. Primenenie global'nyh navigacionnyh sputnikovyyh sistem dlja monitoringa deformacij gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of hydraulic constructions]. *Hydraulic engineering*. 2012;12: 11–19 (In Russian).
  14. Ustinov AV. Tehnologija sputnikovogo geodezicheskogo monitoringa gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Technology of satellite geodetic monitoring of hydropower structures]. *Hydraulic engineering*. 2014;6: 39–43 (In Russian).
  15. García-Armenteros JA. Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*. 2024;15(2): 189–199. DOI:10.1016/j.geog.2023.07.006.
  16. Gałdyn F, Zajdel R, Sośnica K. RINEXAV: GNSS global network selection open-source software based on qualitative analysis of RINEX files. *SoftwareX*. 2023;22: 101372. DOI:10.1016/j.softx.2023.101372.
  17. Bălă AC, Drăgulescu BC, Brebu FM. Analyzing Rinex data files using the Python programming language. *Journal of applied engineering sciences*. 2024;14(1): 167–177. DOI:10.2478/jaes-2024-0021.

18. Václavovic P, Dousa J. G-Nut/Anubis – open-source tool for multi-GNSS data monitoring. *International Association of Geodesy Symposia*. 2016;143: 775–782. DOI:10.1007/13 45\_2015\_97.
19. Chen Z, Cui Y, Li L, et al. GDP: an open-source GNSS data preprocessing toolkit. *GPS Solutions*. 2020;24: 87. DOI:10.1007/s10291-020-01003-z.
20. Lu L, Hu W, Wu T. GDPS: an open-source python-based software package for multi-GNSS data preprocessing. *GPS Solutions*. 2024;28: 138. DOI:10.1007/s10291-024-01678-8.
21. Kawamoto S, Takamatsu N, Abe S. RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*. 2023;75: 54. DOI:10.1186/s40623-023-01811-w.
22. Shi C, Zhao Q, Hu Z. Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites. *GPS Solutions*. 2013;17(1): 103–119. DOI:10.1007/s10291-012-0264-x.
23. Wang G, de Jong K, Zhao Q, et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites. *GPS Solutions*. 2015;19: 129–139. DOI:10.1007/s10291-014-0374-8.
24. Abou Galala M., Kaloop M.R., Rabah M.M., et al. Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination. *Journal of Surveying Engineering*. 2018;144: 04018002. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250.
25. Karpik AP, Kosarev NS, Antonovich KM, et al. Method of metrological inspection of GNSS receivers of a high-connector HEPS monitoring system. *Vestnik SSUGT*. 2019;24(4): 34–43 (In Russian).
26. Hiller B, Li VT, Sukhov IV. Avtomatizirovannaja sistema deformacionnogo monitoringa (ASDM) na Sajano-Shushenskoj GJeS [Automated deformation monitoring system (ASDM) at the Sayano-Shushenskaya HPP]. *Gidrotehnika*. 2014;4(4): 36–43 (In Russian).
27. Yaxuan H, Lin Ch, Xiong W. Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China. *Geodesy and Geodynamics*. 2016;7(2): 87–94. DOI:10.1016/j.geog.2016.03.008.
28. Tereshchenko VE. Analiz kachestva sputnikovyh izmerenij s pomoshh'ju programmnoj utility TEQC [Quality analysis of GNSS observations of reference stations network with the TEQC utility]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(3): 72–88 (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-3-72-88.

**AUTHOR Nikolai S. Kosarev**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying,  
 Faculty of Geodesy and Management  
 PhD in Engineering, Associate Professor

 0000-0003-1806-3651

Submitted: March 21, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



# Перспективный метод проверки нивелиров различных групп точности перед выполнением геодезических работ

**М.А. Конюхов<sup>1</sup>, О.А. Воейко<sup>2</sup>** ✉

<sup>1</sup> Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Россия

<sup>2</sup> Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Королев, Россия

✉ voeйко@ut-mo.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Конюхов М.А., Воейко О.А. Перспективный метод проверки нивелиров различных групп точности перед выполнением геодезических работ // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С 21–29. DOI:10.30533/GiA-2025-050.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** юстировка, плоскость горизонта, поверка, метрологические характеристики, визирная ось, нивелир

**АННОТАЦИЯ** Разработан принципиально новый метод оценки соответствия метрологических характеристик высокоточных, точных или технических нивелиров, применяемых непосредственно перед выполнением инженерно-геодезических работ различного уровня сложности, основанный на измерении с помощью высокоточного электронного тахеометра (вместо нивелирных реек) отклонения визирной оси зрительной трубы нивелира от горизонтальной плоскости (плоскости горизонта). Разработанный метод в сравнении с существующим повышает точность определения действительных значений характеристик нивелиров благодаря исключению ряда дополнительных погрешностей, вызванных недостатками способа, применяемого в настоящее время (погрешность наведения и снятия отсчета с нивелирной рейки, погрешность измерения высоты от поверхности земли до окуляра нивелира, погрешность измерений расстояния между нивелиром и рейкой). Кроме того, новый метод уменьшает трудоемкость за счет проведения проверки путем определения метрологических характеристик методом прямых измерений без использования нивелирных реек, также в несколько раз снижает время проведения юстировки (ремонта) неисправных нивелиров за счет качества выполняемых юстировочных операций, а в дальнейшем может найти широкое применение в подготовке нивелиров различных групп точности перед проведением инженерно-геодезических работ.

## 1 Введение

Средства измерений (СИ) в случае определения их метрологических характеристик в стационарных условиях необходимо транспортировать в места проведения поверочных работ. Например, определение метрологических характеристик нивелиров или СИ геометрического нивелирования (СИ ГН) осуществляется только в стационарных условиях на вторичном эталоне единицы плоского угла. При транспортировании СИ ГН подвергаются резким перепадам температуры, влиянию осадков, пыли, механическим воздействиям, вибрации. Проведенные лабораторные испытания показали, что основные метрологические характеристики СИ ГН при указанных внешних факторах ведут себя крайне нестабильно, следовательно, могут оказать существенное влияние на результаты проведенных измерений [1]. Из-за большого объема СИ ГН, поступающих на поверку, эталон постоянно находится в рабочем состоянии. В связи с этим происходит быстрый износ подвижных частей, старение элементной базы, расход ресурса эксплуатации [2]. В настоящее время требуется разработка современной эталонной базы, удовлетворяющей требованиям различных методов с необходимой точностью в различных условиях эксплуатации [3]. Следовательно, актуальной задачей является разработка метода передачи единицы плоского угла в местах эксплуатации СИ ГН силами выездных метрологических групп.

## 2 Материалы и методы

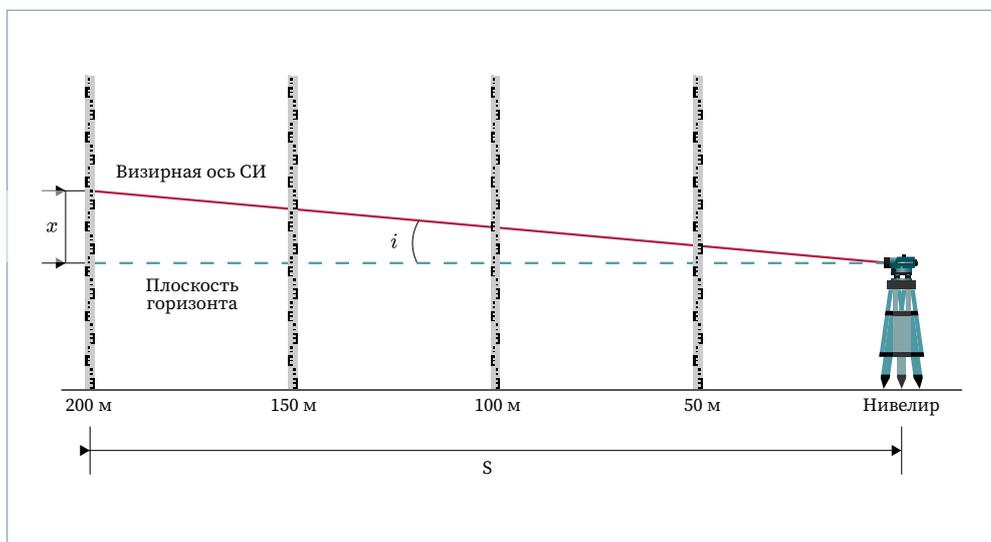
К основным метрологическим характеристикам нивелиров различных групп точности и конструктивного исполнения относятся угол между визирной осью зрительной трубы и плоскостью горизонта (угол  $i$ ) и средняя квадратическая погрешность (СКП) измерения превышения на 1 км двойного хода. В зависимости от сложности выполняемых геодезических работ применяются нивелиры (СИ ГН) различных классов точности. По классу точности нивелиры разделяются на высокоточные (СКП на 1 км двойного хода — 0,3–0,5 мм), точные (СКП на 1 км — 2–3 мм) и технические (СКП на 1 км — 5 мм) [4]. Негативное влияние угла  $i$  на результаты измерений заключается в том, что из-за отклонения визирной оси нивелира от плоскости горизонта определение высот точек местности осуществляется с ошибкой, значение которой возрастает при увеличении расстояния от применяемого нивелира (СИ ГН) до нивелирной рейки (рис. 1). Так, при значении угла  $i$ , равном  $10''$ , ошибка в измерениях превышений составит 2,42 мм для 50 м, 4,85 мм для 100 м, 7,27 мм для 150 м и 9,7 мм для 200 м.

Рис. 1

Негативное влияние угла  $i$  на измерения превышений

Fig. 1

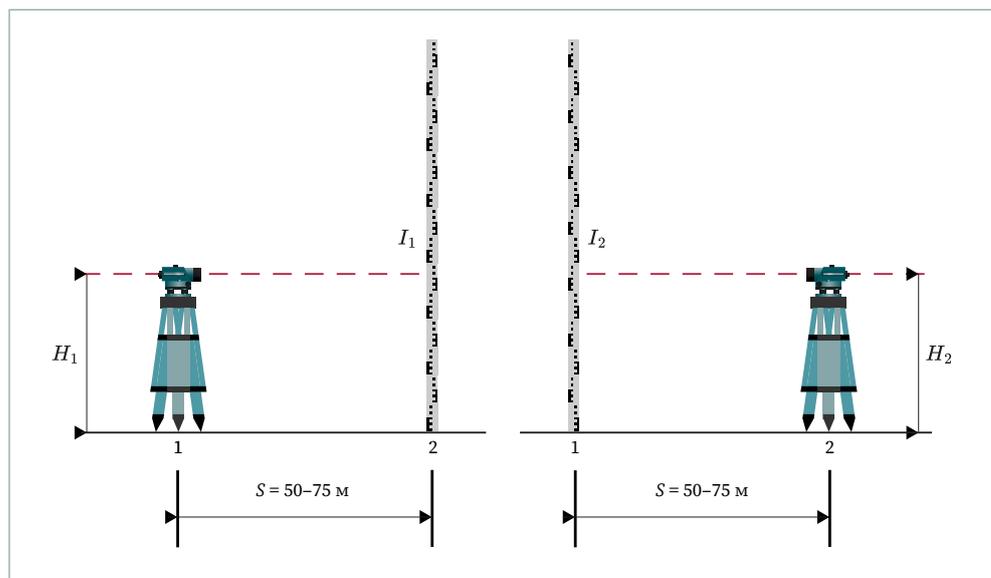
The negative effect of the  $i$  angle on the measurement of exceedances



В целях периодической поверки используется эталонный компаратор для поверки нивелиров типа ЭКПН, а также различные коллиматорные стенды типа ВЕГА УКС, установки автоколлимационные типа АУПНТ и т. д. [5]. В то же время, в соответствии с руководством по эксплуатации, для подготовки нивелиров к работе должна выполняться проверка установочного уровня, фокусировки, установки сетки нитей, а самое главное — проверка положения визирной оси нивелира относительно плоскости горизонта. Для этого в руководстве описан следующий способ: на удалении 50–75 м друг от друга забиваются два ориентира, поверяемый нивелир устанавливается в точке, обозначенной ориентиром 1, нивелирную рейку — в точке, обозначенной ориентиром 2, нивелир приводят в рабочее положение, после чего измеряют с погрешностью не более 1 мм его высоту  $H_1$  и берут отсчет по рейке  $I_1$  (рис. 2).

**Рис. 2** Проверка положения визирной оси нивелира

**Fig. 2** Checking the position of the sighting axis of level



Затем меняют нивелир и рейку местами и выполняют аналогичные измерения  $H_2$  и  $I_2$ , значение угла  $i$  вычисляется по формуле

$$i = \frac{((H_1 + H_2) - (I_1 + I_2))p''}{2S},$$

где  $i$  — отклонение визирной оси зрительной трубы нивелира от плоскости горизонта (угол  $i$ );  
 $I_1, I_2$  — отсчеты по нивелирной рейке;  
 $H_1, H_2$  — высоты от поверхности земли до окуляра нивелира;  
 $S$  — расстояние от нивелира до нивелирной рейки;  
 $p''$  — коэффициент пересчета, равный 206 265.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение трех измерений. Если значение угла  $i$  превышает  $10''$ , проверяемый нивелир подлежит юстировке. У проверки положения визирной оси нивелира относительно плоскости горизонта с помощью нивелирных реек те же недостатки, что и у метода поверки в полевых условиях с помощью высотного стенда: значительные трудозатраты на размещение нивелирных станций (реек), большое количество вспомогательного оборудования, зависимость от погодных условий (дождь, снег, порывы ветра, палящее солнце и т. д.), отсутствие возможности оборудовать рабочее место для поверки СИ ГН из-за особенностей ландшафта местности, препятствующих разворачиванию нивелирной сети, обеспечению прямой видимости станций, а также их стабильности [6]. Кроме того, процесс юстировки занимает долгое время, т. к. после каждой попытки настройки необходимо повторить полностью всю процедуру измерений. Таким образом, определение фактического значения угла  $i$  перед работой является важнейшей операцией для выполнения корректных измерений превышений точек, но в то же время существующий метод характеризуется трудоемкостью и малой точностью.

Для повышения оперативности и упрощения подготовки нивелиров к работе разрабатываемый метод проверки СИ ГН различных групп точности в полевых условиях перед началом выполнения инженерно-геодезических работ должен соответствовать ряду требований. Для передачи единицы плоского угла на местах эксплуатации специальной техники новый метод должен отличаться от существующего возможностью проведения поверки не только в необорудованных помещениях или ангарах, но и в кузове-фургоне автомобиля. Для этого в предлагаемом методе должен быть рассмотрен вариант использования рабочего эталона, позволяющего передавать единицу плоского угла с требуемой точностью в широком температурном диапазоне и отличающегося стойкостью к внешним факторам, независимостью от электропитания, а также возможностью определения метрологических характеристик СИ ГН без использования специального программного обеспечения для ЭВМ [7].

Проблема метрологического обеспечения СИ ГН заключается в том, что их периодическая поверка осуществляется в нормальных климатических условиях ( $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) из-за жестких условий эксплуатации применяемых в настоящее время рабочих эталонов, однако условия эксплуатации СИ ГН — от  $-40$  до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  [8].

Повышение оперативности поверочных работ осуществляется за счет отказа от применения нивелирных реек, а сам метод строится на определении отклонения визирной оси зрительной трубы поверяемого нивелира относительно плоскости горизонта с помощью электронного тахеометра методом прямых измерений. Благодаря тому, что внутренний компенсатор тахеометра автоматически поддерживает визирную ось в заданном направлении, установка значения вертикального угла  $90^\circ 0' 00''$  дает возможность использовать его визирную ось в качестве эталонной горизонтальной плоскости (плоскости горизонта) [9]. При совмещении визирной оси тахеометра с визирной осью поверяемого средства измерений методом «труба в трубу» отклонение значения вертикального угла тахеометра от  $90^\circ$  будет являться отклонением визирной оси поверяемого нивелира относительно плоскости горизонта.

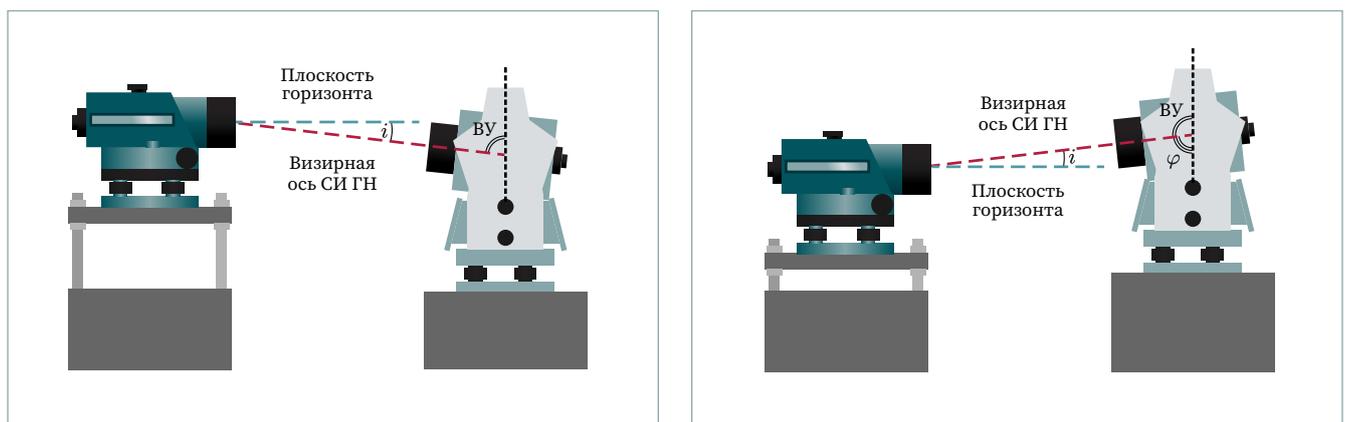
Для фактических измерений значения угла  $i$  с целью определения необходимости юстировки нивелира тахеометр устанавливается напротив поверяемого СИ методом «труба в трубу», после чего зрительную трубу нивелира фокусируют на бесконечность и за его окуляром устанавливают источник света. Далее визирную ось электронного тахеометра совмещают с осью нивелира путем наведения его сетки нитей зрительной трубы на изображение сетки нитей поверяемого СИ. Отклонение значения вертикального угла, измеренного тахеометром, от  $90^\circ 0' 00''$  и будет углом  $i$  поверяемого нивелира (СИ ГН) (рис. 3).

**Рис. 3** 

Определение отклонения визирной оси зрительной трубы нивелира от плоскости горизонта при положительных и отрицательных значениях угла  $i$

**Fig. 3**

Determination of the deviation of the sighting axis of the levelling telescope from the horizon plane at positive and negative values of the angle  $i$



Сумма углов в треугольнике составляет  $180^\circ$ , соответственно, значение угла  $i$  (с положительным знаком) вычисляется по формуле

**2** 

$$i = 180^\circ - (90^\circ + ВУ),$$

где ВУ — вертикальный угол электронного тахеометра.

Если показания вертикального угла электронного тахеометра превышают значение  $90^\circ$ , то значение угла  $i$  (с отрицательным знаком) вычисляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} 3 \quad \blacktriangleright \quad & i = 180^\circ - (90^\circ + \varphi), \\ 4 \quad \blacktriangleright \quad & \varphi = 180^\circ - ВУ, \end{aligned}$$

где  $\varphi$  — вертикальный угол, смежный с вертикальным углом электронного тахеометра.

### 3 Результаты и обсуждение

В существующем методе проверки положения визирной оси нивелиров относительно плоскости горизонта кроме погрешности самого нивелира из-за применения нивелирных реек присутствуют дополнительные погрешности, вызванные оператором-геодезистом при наведении и снятии отсчета с нивелирной рейки, при измерении высоты от поверхности земли до окуляра нивелира, а также при измерении расстояния между нивелиром и рейкой [10]. Все эти факторы уменьшают точность и увеличивают вариацию значений измеренного угла  $i$ , что, в свою очередь, затрудняет выполнение точной юстировки. Поскольку разработанный метод исключает применение нивелирных реек, то к основной погрешности измерений угла  $i$  относится только погрешность применяемого тахеометра, равная  $0,5''$  или  $1''$  (в зависимости от точности тахеометра).

На дистанции 100 м после юстировки существующим методом (при значении угла  $i = 2,5''$ ) погрешность определения превышения будет равна 1,21 мм, а с юстировкой разработанным методом (при значении угла  $i = 1,7''$ ) — всего 0,84 мм (разность составляет 0,37 мм), на 200 м после юстировки существующим методом (при значении угла  $i = 2,5''$ ) погрешность определения превышения будет равна 2,42 мм, а с юстировкой разработанным методом (при значении угла  $i = 1,7''$ ) — всего 1,69 мм (разность составляет уже 0,73 мм).

Апробация разработанного метода была проведена путем сравнения полученных результатов определения угла  $i$  нивелиров с помощью электронного тахеометра в полевых условиях и определения угла  $i$  нивелиров существующим методом в лабораторных условиях на вторичном эталоне единицы плоского угла. Анализ апробации показал, что полученные результаты не превышают предела допускаемых значений.

### 4 Выводы

Реализация разработанного метода проверки отклонения визирной оси зрительной трубы нивелиров с помощью электронного тахеометра позволит не только упростить процесс подготовки нивелиров к выполнению инженерно-геодезических работ, но и повысить ее оперативность в 2,5 раза, а точность — в 1,4 раза.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Решетников А.А. Определение метрологических характеристик средств измерений геометрического нивелирования в местах выполнения специальных задач // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов». СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2022. С. 129–133.
2. Троицкий Д.Б. Метод передачи единицы плоского угла средствам измерений геометрического нивелирования // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны»

- и безопасности в Российской Федерации». Поведники: ГНМЦ МО РФ, 2020. С. 241–243.
3. Решетников А.А., Троицкий Д.Б. Метрологическое обеспечение средств измерений геометрического нивелирования в местах выполнения специальных задач // Материалы военно-научной конференции «Способы получения, обработки, верификации и использования данных из открытых источников для геоинформационного обеспечения». Кубинка: МВТФ, 2022. С. 149–154.
  4. Решетников А.А. Исследования метрологических характеристик оптико-механических и цифровых нивелиров в полевых условиях // Материалы научно-практической конференции «Цель и задачи геоинформационного обеспечения современной высокотехнологичной армии». Кубинка: МВТФ, 2021. С. 102–106.
  5. Мосолков Г.Ю. Состояние и перспективы развития метрологического обеспечения средств измерений геометрического нивелирования // Материалы военно-научной конференции «Геоинформационное пространство. Перспективы развития». Кубинка: МВТФ, 2020. С. 78–81.
  6. Павлович С.В. Аprobация метода передачи единицы плоского угла средствам измерений геометрического нивелирования в местах их эксплуатации // Материалы 47-й научно-технической конференции «Актуальные задачи военной метрологии». Мытищи: ГНМЦ МО РФ, 2022. С. 290–293.
  7. Троицкий Д.Б. Определение метрологических характеристик средств измерений геометрического нивелирования на местах их эксплуатации // Материалы XLII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Серпухов: Фил. Военной акад. РВСН им. Петра Великого, 2023. С. 141–145.
  8. Шпонкин В.Л. Метрологическое обеспечение средств измерений геометрического нивелирования в местах их эксплуатации // Материалы 45-й научно-технической конференции «Актуальные задачи военной метрологии». Мытищи: ГНМЦ МО РФ, 2020. С. 250–253.
  9. Троицкий Д.Б. Метод передачи единицы плоского угла средствам измерений геометрического нивелирования с помощью эталонного тахеометра // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации». Поведники: ГНМЦ МО РФ, 2022. С. 242–245.
  10. Павлович С.В. Новый метод проверки положения визирной оси нивелиров различных групп точности перед эксплуатацией // Материалы 49-й научно-технической конференции «Актуальные задачи военной метрологии». Мытищи: ГНМЦ МО РФ, 2024. С. 209–212.

**АВТОРЫ** **Конюхов Михаил Анатольевич**

✉ [konyukhov.mixail@mail.ru](mailto:konyukhov.mixail@mail.ru)

ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Россия

канд. техн. наук

**Воейко Ольга Александровна**

ФГБОУ «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», Королев, Россия

кафедра управления качеством и стандартизации, Институт ракетно-космической техники и технологии машиностроения

канд. техн. наук, доцент

 0000-0002-7114-4306

Поступила 17.04.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# A future checking method of various accuracy levels before surveying

Michael A. Konyukhov<sup>1</sup>, Olga A. Voeyko<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Main Scientific Metrological Center Ministry of Defense of the Russian Federation, Mytishchi, Russia

<sup>2</sup> Leonov University of Technology, Korolev, Russia

✉ voeyko@ut-mo.ru

**CITATION** Konyukhov MA, Voeyko OA. A future checking method of various accuracy levels before surveying. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 21–29. DOI:10.30533/GiA-2025-050.

**KEYWORDS** adjustment, horizon plane, verification, metrological characteristics, level

**ABSTRACT** A fundamentally new method has been developed to assess the compliance of the metrological characteristics of high-precision, precision and technical levels immediately before performing engineering and geodetic work of various levels of complexity, based on measuring the deviation of the sighting axis of the leveling telescope from the horizon plane using a high-precision tacheometer instead of leveling rails. Thus the developed method, in comparison with the existing one, increases the accuracy of measuring the actual values of the level characteristics by eliminating a number of additional errors caused by the disadvantages of the currently used method (the error of pointing and de-counting from the leveling rail, the error of measuring the height from the ground to the eyepiece of the level, the error of measuring the distance between the level and the rail). In addition, the new method reduces labor intensity by conducting a check by determining metrological characteristics using direct measurements without using leveling rails, and also reduces the time for adjusting (repairing) faulty levels several times due to the quality of the adjustment operations performed. In the future, the developed new method will find wide application in the preparation of levels of various accuracy groups before carrying out engineering and geodetic work.

- REFERENCES**
1. Reshetnikov AA. Opredelenie metrologicheskikh harakteristik sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya v mestah vypolnenija special'nyh zadach [Determination of the metrological characteristics of geometric leveling measuring instruments in places where special tasks are performed]. *Proceedings of the All-Russian*

- Scientific and Practical Conference “Improving the means and methods of collecting and processing geospatial information and specialist training systems”*. Saint Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy; 2022: 129–133. (In Russian).
2. Troitskiy DB. Metod peredachi edinicy ploskogo ugla sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya [Method of transferring the unit of a plane angle to measuring instruments of geometric leveling]. *Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference “Metrological support of defense and security in the Russian Federation”*. Povedniki: Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 2020: 241–243. (In Russian).
  3. Reshetnikov AA, Troitskiy DB. Metrologicheskoe obespechenie sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya v mestah vypolneniya special'nyh zadach [Metrological support of measuring instruments for geometric leveling in places where special tasks are performed]. *Proceedings of the military scientific conference “Methods of obtaining, processing, verifying and using data from open sources for geoinformation support”*. Kubinka: The International Military-Technical Forum; 2022: 149–154. (In Russian).
  4. Reshetnikov AA. Issledovaniya metrologicheskikh harakteristik optiko-mehaniicheskikh i cifrovyyh nivelirov v polevykh usloviyakh [Research of metrological characteristics of optical, mechanical and digital levels in the field]. *Proceedings of the scientific and practical conference “The purpose and objectives of geoinformation support for a modern high-tech army”*. Kubinka: The International Military-Technical Forum; 2021: 102–106. (In Russian).
  5. Mosolkov GY. Sostojanie i perspektivy razvitiya metrologicheskogo obespecheniya sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya [The state and prospects of development of metrological support for measuring instruments of geometric leveling]. *Proceedings of the military scientific conference “Geoinformation space. Development prospects”*. Kubinka: The International Military-Technical Forum; 2020: 78–81. (In Russian).
  6. Pavlovich SV. Aprobacija metoda peredachi edinicy ploskogo ugla sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya v mestah ih jekspluatacii [Approbation of the method of transferring the unit of a flat angle to measuring instruments for geometric leveling in their places of operation]. *Proceedings of the 47th scientific and technical conference “Actual tasks of military metrology”*. Mytishchi: Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 2022: 290–293. (In Russian).
  7. Troitskiy DB. Opredelenie metrologicheskikh harakteristik sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya na mestah ih jekspluatacii [Determination of metrological characteristics of measuring instruments for geometric leveling at their places of operation]. *Proceedings of the XLII All-Russian Scientific and Technical Conference “Problems of efficiency and safety of complex technical and information systems”*. Serpukhov: Peter the Great SRF Military Academy (Serpukhov branch); 2023: 141–145. (In Russian).
  8. Shponkin VL. Metrologicheskoe obespechenie sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya v mestah ih jekspluatacii [Metrological support of measuring instruments for geometric leveling in their places of operation]. *Proceedings of the 45th scientific and technical conference “Actual tasks of military metrology”*. Mytishchi: Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 2020: 250–253. (In Russian).
  9. Troitskiy DB. Metod peredachi edinicy ploskogo ugla sredstv izmerenij geometricheskogo nivelirovaniya s pomoshh'ju jetalonnogo taheometra [Method of transferring a unit of a flat angle to geometric leveling measuring instruments using a reference total station]. *Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference “Metrological support of defense and security in the Russian Federation”*. Povedniki: Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 2022: 242–245. (In Russian).
  10. Pavlovich SV. Novyj metod proverki polozheniya vizirnoj osi nivelirov razlichnykh grupp tochnosti pered jekspluataciej [A new method for checking the position of the sighting axis of levels of various accuracy groups before operation]. *Proceedings of the 49th scientific and technical conference “Actual tasks of military metrology”*. Mytishchi: Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; 2024: 209–212. (In Russian).

**AUTHORS** **Michael A. Konyukhov**

✉ konyuxov.mixail@mail.ru

Main Scientific Metrological Center Ministry of Defense of the Russian Federation,  
Mytishchi, Russia  
PhD in Engineering

**Olga A. Voeyko**

Leonov University of Technology, Korolev, Russia  
Department of Quality Management and Standardization, Institute of Space-rocket  
Techniques and Engineering Technologies  
PhD in Engineering, Associate Professor  
 0000-0002-7114-4306

**Submitted: April 17, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.**



# Связь спектрозональных данных Sentinel-2 с наземными измерениями концентраций метана и метеопараметрами атмосферы в летний период

Н.В. Попов<sup>1</sup>✉, В.А. Малинников<sup>1</sup>, А.И. Нахутин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

✉ nikitappv02@gmail.com

**ЦИТИРОВАНИЕ** Попов Н.В., Малинников В.А., Нахутин А.И. Связь спектрозональных данных Sentinel-2 с наземными измерениями концентраций метана и метеопараметрами атмосферы в летний период // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 30–44. DOI:10.30533/GiA-2025-028.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** метан, спутники, Sentinel-2, парниковые газы, мониторинг, системы наблюдений, Тикси, летний сезон в Арктике

**АННОТАЦИЯ** Статья является продолжением предыдущих исследований по изучению связи приземной концентрации метана с метеопараметрами и данными об уровне серого тона в 12 спектральных каналах Sentinel-2 MSI в районе станции Тикси. Проведен аналогичный анализ по выборке суточных наблюдений и материалов космической съемки в летние месяцы с 2016 по 2022 год. Показано, что регрессионные модели, разработанные по выборке за зимний период в предыдущем исследовании, не применимы к прогнозу приземной концентрации метана в летние месяцы: коэффициент детерминации всех моделей составил менее 0,5; при использовании нелинейной модели были получены отрицательные значения приземной концентрации метана. Методом регрессионного анализа выявлены соотношения каналов Sentinel-2 MSI, или индексы, учет которых вместе с параметром скорости ветра в единой статистической модели приводит к наибольшему увеличению коэффициента детерминации модели для оценки приземной концентрации метана в летний период по материалам космической съемки и данным метеопараметров. Разработаны две регрессионные модели оценки приземной концентрации метана, учитывающие соотношения 2, 4, 7, 8, 9, 10 и 11-го каналов Sentinel-2 MSI и данные о скорости ветра. В результате сопоставления спектральных характеристик указанных каналов MSI с линиями

поглощения газовых составляющих атмосферы обнаружено, что модели, разработанные для летнего периода, описывают те же явления, что учитываются в моделях для зимнего периода: изменение концентрации метана в атмосфере и сток метана из-за его реакции с гидроксил-радикалом ОН.

## 1 Введение

В настоящее время активно развиваются спутниковые методы оценки концентраций парниковых газов [1, 2]. Первый космический аппарат, выполнявший подобные задачи, был введен в эксплуатацию еще в 1997 году — это IMG (*англ.* The Interferometric Monitor for Greenhouse Gases). Затем данную миссию продолжили спутники SCHIAMACHY, GOSAT Японского космического агентства Жаха и TROPOMI Европейского космического агентства [3, 4]. В настоящее время действует и планируется к запуску еще несколько спутников, которые измеряют как углекислый газ, так и метан. Зачастую данные спутников, измеряющих концентрации парниковых газов, калибруют по данным наземных измерений, например сети станций TCCON [5, 6] или других станций, в том числе международной системы «Глобальная служба атмосферы» (*англ.* Global Atmosphere Watch) [7].

В настоящей работе основное внимание уделено метану (CH<sub>4</sub>). В последнее время наибольшее развитие получили методы восстановления концентраций метана с помощью инверсии и использования моделей транспорта излучения в атмосфере, которые применяются совместно с реальными измерениями спутников. Однако недостатком данных методов является необходимость проведения сложных математических расчетов по моделям транспорта излучения в атмосфере и использования большого количества данных из открытых источников [3, 8–9]. В исследованиях, которые легли в основу данной работы, было сделано допущение, что возможно разработать более простые регрессионные модели оценки приземной концентрации метана по данным значений метеопараметров приземной атмосферы и регистрируемого спутником излучения [10]. Ранее был проведен анализ статистической взаимосвязи приземных концентраций метана, метеопараметров на арктической станции Тикси и уровня серого тона в 12 каналах Sentinel-2 MSI в зимний период. Обнаружено, что существует сильная линейная и нелинейная зависимость между данными Sentinel-2 MSI, метеопараметрами и приземной концентрацией метана: значение коэффициента детерминации  $R^2$  для двух случаев оказалось больше 0,6, а стандартная ошибка меньше 15 ppb, что меньше 1 % от средней концентрации метана в зимний период в Тикси. Результатом исследования стали две регрессионные модели — линейная (1) и нелинейная (2) (все данные об уровне серого в каналах MSI представляют собой безразмерный коэффициент отражения на уровне верхней границы атмосферы [TOA reflectance]):

$$1 \quad C_{CH_4} = 2561,026 + 0,0265X1 - 0,00216X2 - 0,5926X3 - 5,9381X4,$$

$$2 \quad C_{CH_4} = 1956,784 + 0,121\left(\frac{x5}{x3}\right) - 3,75 \times 10^{-13}(x5 \times x2 \times x3 \times x4) - 1,06 \times 10^{-7}(x5 \times x3) - 1,36 \times 10^{-4}(x2 \times x4^2),$$

где  $C_{CH_4}$  — приземная концентрация метана, ppb;  
 $X1$  и  $X2$  — уровень серого, осредненный по территории радиусом 12 пикселей, или 354 м вокруг точки измерений приземной концентрации метана на космическом изображении, полученный в 12-м и 5-м каналах Sentinel-2 MSI соответственно, безразмерный;  
 $X3$  и  $X4$  — атмосферное давление и парциальное давление пара соответственно, гПа;

X5 — произведение уровня серого, осредненного по территории радиусом 354 м вокруг точки измерения приземной концентрации метана на космическом изображении, полученного в 11-м и 12-м каналах Sentinel-2 MSI, безразмерный.

В предыдущем исследовании был сделан вывод о необходимости разработки регрессионной модели в летний период. Таким образом, целью настоящей статьи, являющейся продолжением предыдущих исследований, стала разработка регрессионной модели зависимости данных Sentinel-2 MSI и метеопараметров от приземной концентрации CH<sub>4</sub> в районе Тикси в летний период.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- сбор базы данных выборки приземных измерений и материалов космической съемки, их обработка и подготовка к статистическому анализу;
- апробация регрессионной модели, разработанной для зимнего периода по данным выборки для летнего периода;
- анализ каналов сенсора, измерения в которых наиболее коррелируют с измерениями приземной концентрации метана в летний период;
- регрессионный анализ и анализ качества разработанных регрессионных моделей.

## 2 Материалы и методы

Для достижения поставленной цели использовался массив данных станции Тикси за летние месяцы с 2016 по 2022 год<sup>1</sup>. За указанный период также были отобраны снимки со спутников Sentinel 2A/B в 12 каналах без атмосферной коррекции с целью исключения искажения результатов.

Массив данных Тикси содержит информацию об осредненных за час, день и месяц значениях концентрации метана и метеопараметров. Приземная концентрация метана на станции измеряется с помощью лазерного анализатора концентраций парниковых газов Picarro G2301, забор воздуха из окружающей среды к газоанализатору осуществляется насосом Metal-Bellows MB-158E по 13-метровой тефлоновой трубе (рис. 1) [11]. На станции измеряются следующие метеопараметры: направление и скорость ветра, атмосферное давление, относительная влажность и температура приземного воздуха. Для проведения анализа отбирался массив данных среднесуточных значений метеопараметров и концентраций метана.

**Рис. 1**   
Фотографии станции Тикси  
(автор снимков — Андрей  
Валерьевич Рябов)

**Fig. 1**  
Photos of Tiksi station  
(photos by Andrei V. Ryabov)

Станция снаружи / Station outside



Внутренняя измерительная аппаратура / Inside measurement infrastructure



1 Laurila T., Dlugokecky E., Ivakhov V., et al. Atmospheric CH<sub>4</sub> at Tiksi by Finnish Meteorological Institute. 2022. Version 2022-07-08-2150. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://doi.org/10.50849/WDCGG\\_0025-2002-1002-01-01-9999](https://doi.org/10.50849/WDCGG_0025-2002-1002-01-01-9999) (дата обращения: 09.12.2024).

Подготовка массивов метеоданных, приземных концентраций метана и данных спутника выполнялась методом, аналогичным использованному в предыдущем исследовании, с одним исключением: в предлагаемой работе не проводилась очистка массива приземных концентраций метана от всплесков в связи с тем, что в летний период их наличие может быть обусловлено как антропогенными, так и естественными выбросами, в то время как в зимний период естественные источники метана на поверхности практически неактивны [10].

Апробация регрессионной модели для зимнего периода (далее — зимняя модель) по суточным наблюдениям летнего периода проводилась двумя способами:

- 1) методом расчета по коэффициентам в формулах (1) и (2);
- 2) перерасчетом коэффициентов зимних моделей по суточным наблюдениям летнего периода.

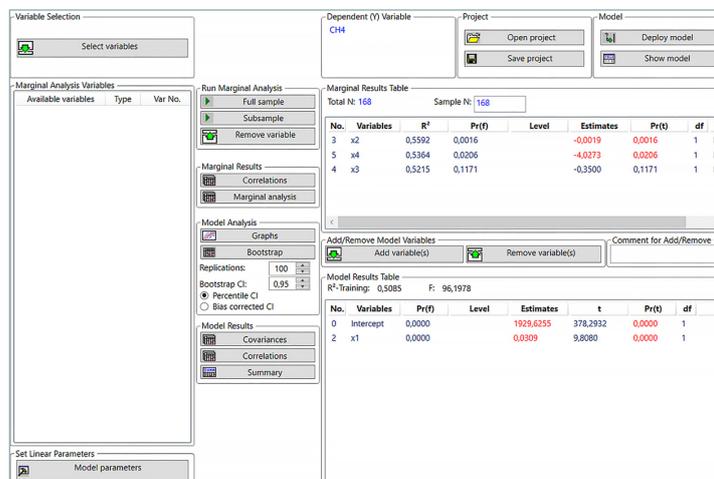
После апробации проводился анализ статистики регрессионных моделей: нормированного  $R^2$ ,  $F$ -статистики и стандартной ошибки<sup>2</sup>.

Был осуществлен корреляционный анализ данных: между данными об уровне серого в каналах Sentinel-2 MSI и приземной концентрацией метана в летний период построены коэффициенты корреляции Пирсона. Проводился поиск факторов, наиболее коррелирующих с приземной концентрацией метана.

Регрессионный анализ проходил по следующему алгоритму:

1. Рассчитывались индексы, или комбинации между осредненными значениями уровня серого 12 каналов Sentinel-2 MSI, соответствующие отношениям  $(K - K) / (K + K)$ ;  $(K - K) / K$ ;  $(K + K) / K$ ;  $K / (K + K)$ ;  $K / K$  (где  $K$  — данные одного из каналов MSI). Всего было построено более 5000 индексов.
2. Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона (далее —  $R$ ) между приземной концентрацией метана и каждым индексом. По наибольшему значению модуля  $R$  проводился отбор первого индекса.
3. Рассчитывались  $R$  между первым индексом и остальными, и проводился отбор массива индексов, соответствующих условию: модуль значения  $R$  между проверяемым индексом и первым не превышает 0,49.
4. В отобранном массиве проводился поиск второго индекса, добавление которого в регрессионную модель вместе с первым вносит наибольший вклад в увеличение  $R^2$  среди остальных индексов массива.
5. После подбора пары индексов инструментом «Пошаговое построение модели» в статистической программе TIBCO Statistica v13.0.5.17 (рис. 2) подбирался метеопараметр, добавление которого в модель из пары индексов приводит к наибольшему увеличению  $R^2$ . На выходе из шага 4 получалась наилучшая нелинейная регрессионная модель, в которой все факторы имеют первый порядок.

**Рис. 2**  Пример работы инструмента «Пошаговое построение модели» в Statistica 13  
**Fig. 2** Example of “Stepwise linear regression instrument” work in Statistica 13



2 Грекусис Дж. Методы и практика пространственного анализа / пер. с англ. А.Н. Киселева. М.: ДМК Пресс, 2021. 540 с.

6. Проводился анализ качества подобранной модели из двух индексов и одного метеопараметра по методологии, использованной в предыдущем исследовании [10].
7. При наличии признаков нелинейной зависимости проводилось увеличение порядка метеопараметра и осуществлялся повторный анализ качества модели. На выходе из шага 6 получалась наилучшая нелинейная регрессионная модель с метеопараметром, возведенным в четвертую степень.
8. После получения итоговой модели проводился анализ выбросных точек по разнице стандартных остатков суточных наблюдений между двумя моделями: в случае если в первой модели было обнаружено наблюдение со стандартным остатком, по модулю больше или равным 1,9, а во второй модели с большим  $R^2$  его значение увеличилось, то оно удалялось из выборки с допущением, что данное наблюдение не подвержено той же тенденции, что и остальной набор данных. Удаление проводилось в две итерации, после каждой из которых очищалась выборка и пересчитывалась статистика моделей.

Вышеупомянутая методика регрессионного анализа отличается от примененной в предыдущем исследовании для зимнего периода, поскольку в холодный сезон изолируются естественные источники метана на поверхности, отсутствует изменение подстилающей поверхности, ограничен по высоте слой перемешивания и существует сильная корреляция между метаном и уровнем серого в 12-м канале Sentinel-2 MSI [10]. Летом из-за влияния изменений подстилающей поверхности, активизации естественных поверхностных источников метана и увеличения слоя перемешивания построение индексов необходимо с целью выявления зависимостей, более точно объясняющих изменение приземной концентрации метана, чем данные об уровне серого в отдельно взятых каналах Sentinel-2 MSI.

### 3 Результаты

Из архивных среднесуточных данных метеостанции Тикси и спутниковых изображений была собрана выборка из 74 наблюдений различных метеопараметров и уровня серого тона космических изображений. Результаты апробации зимней модели по данным выборки за летний период приведены в табл. 1.

**Таблица 1**   
 Результаты апробации зимней модели по данным летнего периода разными методами

**Table 1**  
 Results of approbation of model for winter period on summer data using different methods

Модель	Метод	$R^2$	$F$ (значимость $F$ )	Стандартная ошибка
Линейная	1	0,0408	0,71	46,72
	2	0,34	$8,5(3,7 \times 10^{-6})$	24
Нелинейная	1	Получены отрицательные значения концентрации метана		
	2	0,36	$11,1(5,55 \times 10^{-7})$	30

Из табл. 1 видно, что параметры, характеризующие взаимосвязь приземной концентрации метана, спектрзональных данных Sentinel-2 MSI и метеопараметров в зимний период, плохо объясняют аналогичную взаимосвязь в летний период, что также подтверждается другими исследованиями [12].

В табл. 2 приведены парные коэффициенты корреляции Пирсона между данными сенсора и приземной концентрацией метана.

На этапе регрессионного анализа были обнаружены 2 наблюдения, отклоняющиеся от линии регрессии на два стандартных отклонения (рис. 3).

После первой итерации были удалены 2 наблюдения, полученные 28.08.2018 и 27.08.2020 (на рис. 3 порядковые номера 29 и 69 соответственно). Во время второй итерации не было обнаружено выбросов, удовлетворяющих критериям.

	Ежедневная концентрация CH <sub>4</sub>	Значения уровня серого в каналах спутника, осредненные по территории вокруг точки измерения приземной концентрации метана											
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й
Ежедневная концентрация CH <sub>4</sub>	1,000												
Значения уровня серого в каналах спутника, осредненные по территории вокруг точки измерения приземной концентрации метана	1-й	0,235	1,000										
	2-й	0,194	0,995	1,000									
	3-й	0,174	0,980	0,993	1,000								
	4-й	0,075	0,962	0,981	0,988	1,000							
	5-й	-0,225	-0,300	-0,275	-0,238	-0,191	1,000						
	6-й	0,265	0,837	0,852	0,888	0,839	-0,162	1,000					
	7-й	0,313	0,785	0,795	0,833	0,770	-0,174	0,991	1,000				
	8-й	0,316	0,771	0,778	0,814	0,753	-0,147	0,981	0,992	1,000			
	9-й	0,208	0,666	0,664	0,678	0,651	0,023	0,762	0,752	0,817	1,000		
	10-й	0,433	0,718	0,699	0,706	0,636	-0,205	0,724	0,742	0,775	0,808	1,000	
	11-й	0,309	0,395	0,354	0,343	0,275	-0,175	0,399	0,460	0,502	0,576	0,790	1,000
	12-й	0,279	0,585	0,555	0,546	0,498	-0,143	0,535	0,564	0,613	0,743	0,899	0,950

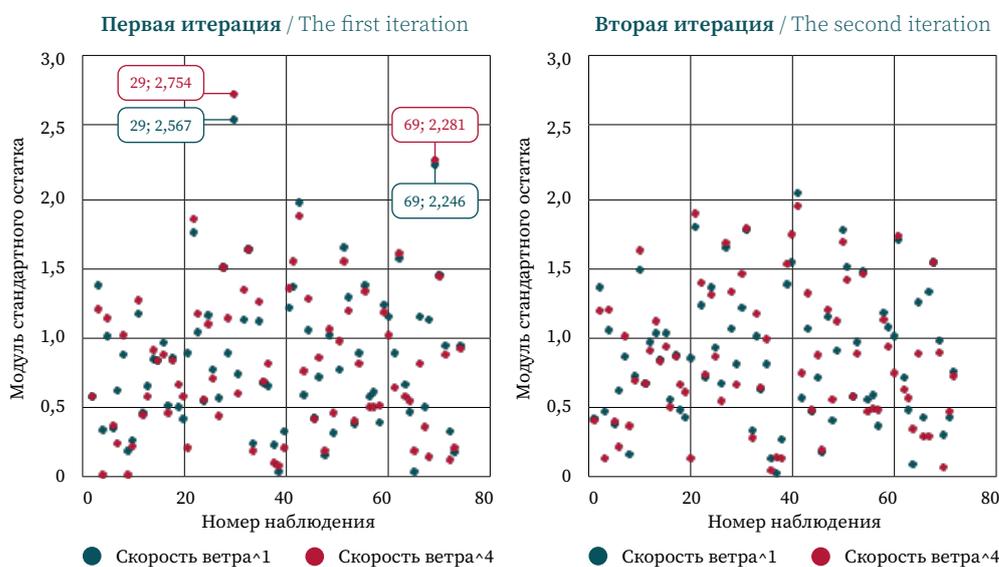
**Таблица 2** ↕

Коэффициенты корреляции Пирсона между данными спутника и приземной концентрацией метана

**Table 2**  
Pearson correlation coefficients between satellite data and ground-level methane concentration

**Рис. 3** ▶  
Результаты анализа стандартных остатков моделей с параметрами скорости ветра в 1-й и в 4-й степени

**Fig. 3**  
Standard residuals of 1st and 4th degree models outliers analysis in first and second iteration



После очистки экспериментальных данных для статистического анализа была подготовлена выборка из 72 суточных наблюдений. Для расчета модели, как и в предыдущем исследовании, отбирались средние значения уровня серого в каналах спутника в радиусе 6, 12 и 18 пикселей, или 168, 354 и 504 м соответственно [10].

Было проведено исследование на статистическую взаимосвязь всех возможных комбинаций, или индексов, из 12 каналов Sentinel-2 MSI и приземной концентрации метана, в результате были выявлены два индекса, приведенные в формулах (3) и (4). Добавление параметра скорости ветра в регрессионную модель привело к наибольшему увеличению значения нормированного  $R^2$  по сравнению с другими метеопараметрами. В итоге были разработаны две нелинейные модели: одна – с параметром скорости ветра в первом порядке, другая – с параметром скорости ветра в четвертом порядке (далее – модели первого и четвертого порядка соответственно).

Рассчитанные нелинейные регрессионные модели первого и четвертого порядка описываются следующими выражениями (все данные об уровне серого в каналах MSI представляют собой безразмерный коэффициент отражения на уровне верхней границы атмосферы [TOA reflectance]):

3 ➤  $C_{CH_4} = 2190,613 - 295,467X1 - 5,619X2 + 136,285X3,$   
 4 ➤  $C_{CH_4} = 2182,83 - 302,67X1 - 0,01X2^4 + 127,74X3,$

где  $X1$  – отношение средних уровней серого тона 4, 2 и 10-го каналов в радиусе 12 пикселей вокруг точки измерения метана на космическом изображении: 4-й канал / (2-й канал + 10-й канал), безразмерный;

$X2$  – скорость ветра, м/с;

$X3$  – отношение средних уровней серого 8, 9, 7 и 11-го каналов в радиусе 12 пикселей вокруг точки измерения метана на космическом изображении: (8-й канал – 9-й канал) / (7-й канал + 11-й канал), безразмерный.

Характеристики параметров и качества рассчитанных нелинейных регрессионных моделей приведены в табл. 3 и 4.

На рис. 4–6 приведены квантиль-квантильные графики вероятностей, графики стандартных остатков и сопоставления приземных и модельных значений концентрации метана (все графики сделаны в программе TIBCO Statistica v13.0.5.17).

**Таблица 3** ➤  
Характеристики параметров регрессионных моделей

**Table 3**  
Characteristics of regression models parameters

Параметр	$\beta$ -коэффициент	Стандартная ошибка	$t$ -статистика	$P$ -значение
<b>Модель первого порядка</b>				
Нулевой член		26,578	82,423	$7,13 \times 10^{-70}$
$X1$	-0,771	30,687	-9,628	$2,51 \times 10^{-14}$
$X2$	-0,219	1,961	-2,865	$5,54 \times 10^{-3}$
$X3$	0,182	60,524	2,252	$2,76 \times 10^{-2}$
<b>Модель четвертого порядка</b>				
Нулевой член		24,46	89,25	$3,34 \times 10^{-72}$
$X1$	-0,79	29,16	-10,38	$1,17 \times 10^{-15}$
$X2^4$	-0,284	0,003	-3,90	$2,25 \times 10^{-4}$
$X3$	0,17	57,91	2,21	$3,08 \times 10^{-2}$

**Таблица 4** ➤  
Характеристики качества регрессионных моделей

**Table 4**  
Characteristics of regression models quality

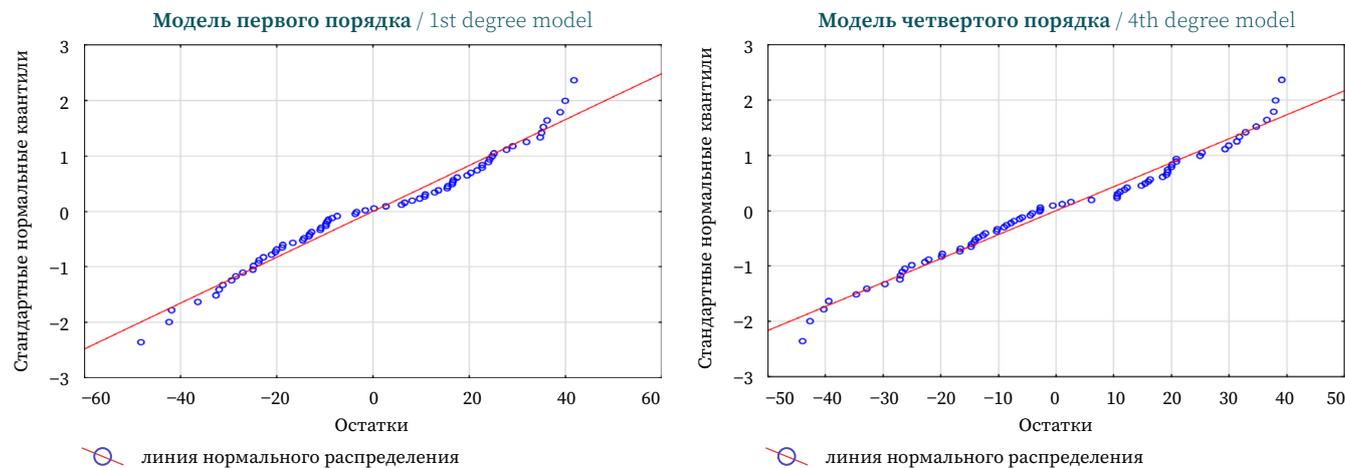
Параметр	Модель	
	первого порядка	четвертого порядка
Множественный $R$	0,786	0,806
$R^2$	0,617	0,649
Нормированный $R^2$	0,6	0,634
Стандартная ошибка	23,98	22,948
Критерий Фишера ( $F$ )	36,56	41,98
Критическое ( $F$ )	$3,47 \times 10^{-14}$	$1,81 \times 10^{-15}$

**Рис. 4**

Квантиль-квантильные графики вероятностей моделей первого и четвертого порядка

**Fig. 4**

Normal plot of residuals of 1st and 4th degree models

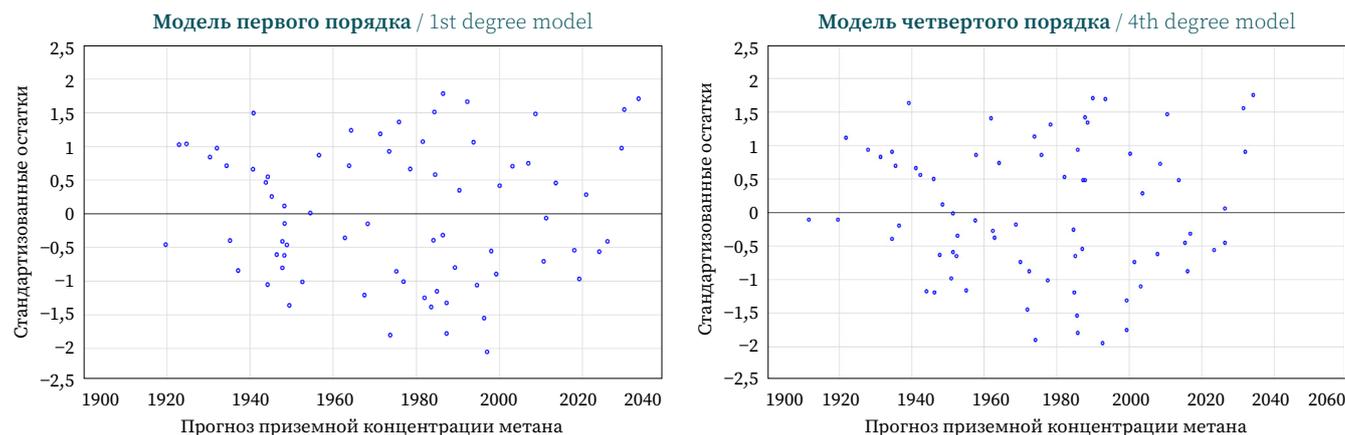


**Рис. 5**

Графики рассеяния стандартных остатков моделей первого и четвертого порядка

**Fig. 5**

Scatter plot of standard residuals of 1st and 4th degree models

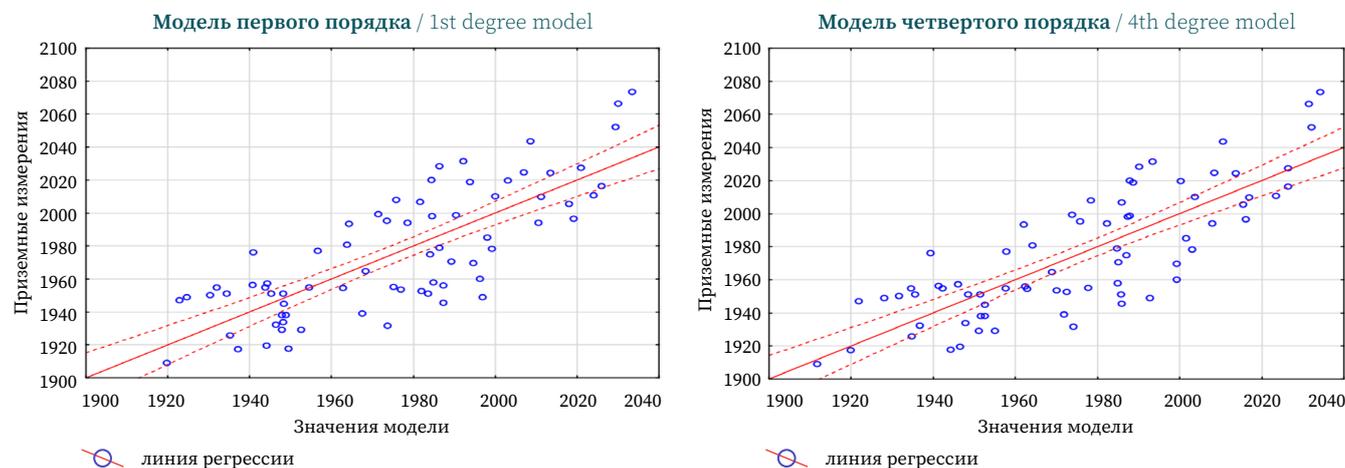


**Рис. 6**

Графики сопоставления приземных измерений концентрации  $CH_4$  и значений моделей первого и четвертого порядка

**Fig. 6**

Scatter plots between ground-level  $CH_4$  measurements and values of 1st and 4th degree models, consequently



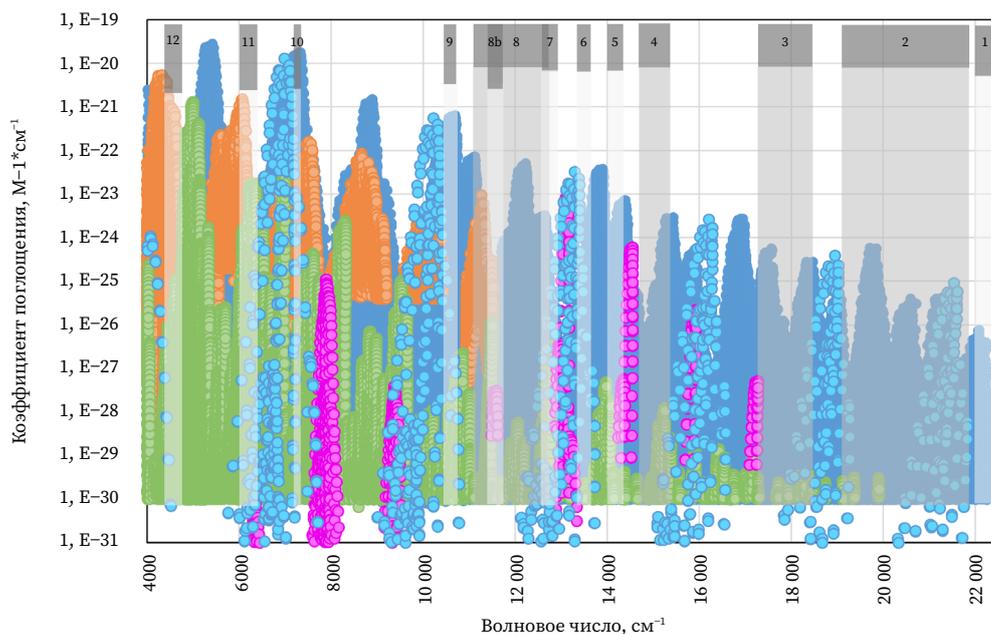
## 4 Обсуждение

**Рис. 7**  Соответствие спектральных характеристик каналов Sentinel-2 MSI и атмосферных газов [13]

**Fig. 7** Matching of spectral characteristics of Sentinel-2 channels and atmospheric components [13]

**Условные обозначения**

- H<sub>2</sub>O
- CH<sub>4</sub>
- CO<sub>2</sub>
- O<sub>2</sub>
- OH



Для объяснения полученных результатов был составлен график, показывающий соответствие спектральных характеристик атмосферных газов и каналов Sentinel-2 MSI (рис. 7)<sup>3</sup> [13].

Согласно данным в табл. 2, в наибольшей степени с приземной концентрацией метана коррелируют данные коротковолнового инфракрасного диапазона, начиная от 5-го канала. На рис. 7 видно, что в коротковолновом и ближнем инфракрасном диапазонах (до 14 500 см<sup>-1</sup>) коэффициенты поглощения излучения различными газовыми составляющими атмосферы больше, чем в видимом. В диапазоне 5-го канала также находится слабая линия поглощения кислорода. В предыдущих исследованиях наибольший коэффициент корреляции наблюдался между данными о приземной концентрации метана и уровнем серого в 11-м и 12-м каналах, однако для летнего периода, согласно табл. 2, схожая тенденция не наблюдается [10].

В результате очистки из выборки летнего периода были исключены 2 наблюдения. Таким образом, сокращение количества наблюдений составило не более 3 % от изначального объема выборки.

Из рис. 7, формул (3) и (4) видно, что скорость ветра напрямую определяет снос масс метана в приземном слое атмосферы, а подобранные индексы могут описывать процессы, влияющие на концентрацию метана в приземной слое атмосферы. Можно представить параметры X1 и X3 формул (3) и (4) в виде выражений (5) и (6), где каждый канал — это сумма средних для его диапазона коэффициентов поглощения различных газовых составляющих, приведенных на рис. 7.

Тогда индекс 4 / (2 + 10) можно выразить следующей формулой:

**5** 

$$\frac{8 \times 10^{-27} H_2O + 1 \times 10^{-29} CO_2 + 4 \times 10^{-30} OH}{1 \times 10^{-22} H_2O + 4 \times 10^{-28} CO_2 + 2 \times 10^{-24} OH + 2 \times 10^{-24} CH_4},$$

а индекс (8 - 9) / (7 + 11) — как

**6** 

$$\frac{-3 \times 10^{-24} H_2O - 5 \times 10^{-30} CO_2 - 5 \times 10^{-26} OH + 2 \times 10^{-25} CH_4}{1 \times 10^{-27} H_2O + 1 \times 10^{-25} CO_2 + 1 \times 10^{-25} OH + 6 \times 10^{-24} CH_4 + 7 \times 10^{-28} O_2}.$$

Из формулы (5) следует, что и в числителе, и в знаменателе дроби присутствуют коэффициенты поглощения H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и OH, однако в знаменателе есть

<sup>3</sup> Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook) (дата обращения: 03.02.2025).

коэффициент поглощения излучения метаном. Таким образом, в данном индексе варьирование концентраций пара и гидроксил-радикала не будет приводить к значимому изменению индекса, в то время как увеличение или уменьшение концентрации  $\text{CH}_4$  будет обратно пропорционально влиять на значение индекса  $X1$ .

Из формулы (6) следует, что и в числителе, и в знаменателе есть одинаковые газовые составляющие, но с одним отличием: в знаменателе также присутствует коэффициент поглощения излучения кислородом. Следует отметить, что кислород при его фотохимических превращениях вместе с водяным паром в атмосфере приводит к образованию гидроксил-радикала  $\text{OH}$  — главного элемента, вызывающего сток метана из атмосферы.

Можно предположить, что разработанные для летнего сезона модели описывают примерно те же явления, что и модели, ранее разработанные для зимнего сезона, в которых также учитывается концентрация  $\text{O}_2$  благодаря наличию линии его поглощения в диапазоне 5-го канала и оценивается изменение концентрации  $\text{CH}_4$  благодаря включению в модель данных 11-го и 12-го каналов [10].

Бета-коэффициенты модели первого порядка по модулю незначительно отличаются от коэффициентов модели четвертого порядка: и в том и в другом случае бета-коэффициент переменной  $X1$  в три раза превышает остальные. Это может быть обусловлено тем, что увеличение концентрации  $\text{CH}_4$  напрямую влияет на уменьшение значения фактора  $X1$ .

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что при увеличении параметра скорости ветра от первого порядка к четвертому нормированный  $R^2$  увеличивается с 0,6 до 0,63.  $F$ -статистика также увеличивается, и стандартная ошибка модели уменьшается с 24 до 23 ppb. Из этого следует, что модель первого порядка незначительно хуже отображает связи между переменными и приземной концентрацией метана, чем модель четвертого порядка.

При рассмотрении рис. 3–5 видно, что в модели первого порядка остатки более схожи с нормальным распределением, в сравнении с моделью четвертого порядка, что может быть обусловлено неустойчивостью модели при увеличении порядка метеопараметра.

Чтобы определить релевантность разработанных моделей для прогноза концентраций метана в летний период, необходимо провести апробацию данных моделей на контрольной выборке суточных наблюдений, не использованных для построения регрессии, например по данным других станций мониторинга приземной концентрации метана.

## 5 Выводы

Разработаны две нелинейные регрессионные статистические модели оценки приземной концентрации метана по данным Sentinel-2 MSI и скорости ветра в летний период (учитывающие отношения между 2, 4, 7, 8, 9, 10 и 11-м каналами спутника и скоростью ветра). Разработанные модели статистически значимы и позволяют оценить приземную концентрацию метана с погрешностью  $\pm 23$  ppb.

Результаты апробации ранее разработанных моделей на данных летней выборки показали, что модели, созданные для одного сезона, не применимы к данным другого сезона из-за различий в состоянии поверхности и атмосферных процессов: значения  $R^2$  составили менее 0,5, а при использовании нелинейной модели были получены отрицательные значения приземной концентрации метана.

Разработанные статистические модели учитывают явления и процессы, характерные для летнего периода в окрестностях станции Тикси, однако параметры регрессионных моделей, подобранные для двух сезонов, описывают одни и те же явления, связанные с изменением концентрации метана и его стоком из атмосферы благодаря реакции с гидроксил-радикалом  $\text{OH}$ .

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

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Зеленова М.С., Гинзбург В.А., Максимова О.В. и др. Обзор действующих и планируемых систем спутникового мониторинга парниковых газов и возможности их применения для решения прикладных климатических задач // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. 2022. Т. 33, № 1-2. С. 108–130. DOI:10.21513/0207-2564-2022-1-2-108-130.
  2. Успенский А.Б. Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 122–144. DOI:10.21513/2410-8758-2022-1-122-144.
  3. Jiang Y., Zhang L., Zhang X., et al. Methane Retrieval Algorithms Based on Satellite: A Review // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 4. P. 449. DOI:10.3390/atmos15040449.
  4. Jacob D.J., Varon D.J., Cusworth D.H., et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. Vol. 22. No. 14. P. 9617–9646. DOI:10.5194/acp-22-9617-2022.
  5. Koshelev D. First ground based FTIR-TCCON measurements of CO<sub>2</sub> in a European megacity: comparison with a rural site and validation of satellite measurements: dissertation. Paris, 2018. 129 p.
  6. Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Березин И.А. и др. Анализ содержания CO<sub>2</sub> вблизи российских городов по спутниковым измерениям ОСО-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 7. С. 538–543. DOI:10.15372/AOO20200706.
  7. Schultz M., Akimoto H., Bottenheim J., et al. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network // Elementa: Science of the Anthropocene. 2015. Vol. 3. P. 000067. DOI:10.12952/journal.elementa.000067.
  8. Lorente A., Borsdorff T., Martinez-Velarte M.C., et al. Evaluation of the methane full-physics retrieval applied to TROPOMI ocean sun glint measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2022. Vol. 15. No. 22. P. 6585–6603. DOI:10.5194/amt-15-6585-2022.
  9. Cooper J., Dubey L., Hawkes A. Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector: the role of satellites in emissions detection, reconciling and reporting // Environmental Science: Atmospheres. 2022. Vol. 2. P. 9–23. DOI:10.1039/D1EA00046B.
  10. Попов Н.В., Малинников В.А. Разработка статистических моделей оценки концентрации метана в приземном слое атмосферы по материалам космической съемки в зимний период // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 3. С. 77–85. DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-3-77-85.
  11. Кочеткова Е.Д. Наблюдения за концентрацией парниковых газов в ГМО Тикси // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 г. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. С. 506–510.
  12. Родионова Н.В. Корреляция наземных и спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы в районе Тикси // Исследование Земли из космоса. 2022. № 4. С. 3–11. DOI:10.31857/S0205961422040054.
  13. Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2022. Vol. 277. P. 107949. DOI:10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

**АВТОРЫ** **Попов Никита Владиславович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра космического мониторинга и экологии, факультет картографии  
 0000-0000-2935-4390

**Малинников Василий Александрович**

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

кафедра космического мониторинга и экологии, факультет картографии

д-р техн. наук, профессор

 0000-0002-8663-755X

**Нахутин Александр Ильич**

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,  
Москва, Россия

отдел мониторинга выбросов парниковых газов в энергетике и промышленности

канд. физ.-мат. наук

Поступила 06.02.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations in summer

Nikita V. Popov<sup>1</sup>✉, Vasiliy A. Malinnikov<sup>1</sup>, Alexandr I. Nakhutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

✉ nikitappv02@gmail.com

**CITATION** Popov NV, Malinnikov VA, Nakhutin AI. Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations in summer. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 30–44. DOI:10.30533/GiA-2025-028.

**KEYWORDS** methane, satellite, Sentinel-2, greenhouse gases, monitoring, observations, concentrations, Tiksi, Arctic summer season

**ABSTRACT** This work is a continuation of previous studies on the relation between surface methane concentration with meteorological parameters and data on gray tone in 12 spectral bands of Sentinel-2 in the vicinity of Tiksi station. Almost similar analysis was carried out using a sample of daily observations and satellite imagery in summer months for the period from 2016 until 2022 year. It is shown that the regression models, calculated using sample of data for winter period are not applicable to predict surface methane concentration in summer months: determination coefficient for all models was less than 0,5, application of nonlinear models resulted in negative methane concentration. Regression analysis revealed a relation of Sentinel-2 spectral bands, or indices which inclusion together with wind speed in single statistical model caused the highest increase of determination coefficient. Two regression models were developed to evaluate surface methane concentration, which include relations between 2, 4, 7, 8, 9, 10 and 11 Sentinel-2 MSI bands and data on wind speed. After comparison of given MSI spectral bands with absorption lines of atmospheric gas components, it was found, that developed models for summer period are describing same effects as models for winter period: methane concentrations variability in atmosphere and sink of methane due to its reaction with hydroxyl radical OH.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The work was performed within the framework of the state assignment No. FSFE-2023-0005 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

- REFERENCES**
- Zelenova MS, Ginzburg VA, Maksimova OV, et al. Obzor dejstvujushhijh i planiruemyh sistem sputnikovogo monitoringa parnikovyh gazov i vozmozhnosti ih primeneniya dlja reshenija prikladnyh klimaticheskikh zadach [Review of operating and planned satellite greenhouse gas monitoring systems and possibilities for their application in solving applied climate problems]. *Eco monitoring and ecosystems modelling*. 2022;33(1-2): 108–130. (In Russian). DOI:10.21513/0207-2564-2022-1-2-108-130.
  - Uspenskij AB. Izmereniya raspredelenija sodержaniya parnikovyh gazov v atmosfere so sputnikov [Satellite-based measurements of greenhouse gases in atmosphere]. *Fundamental and applied climatology*. 2022;8(1): 122–144. (In Russian). DOI:10.21513/2410-8758-2022-1-122-144.
  - Jiang Y, Zhang L, Zhang X, et al. Methane Retrieval Algorithms Based on Satellite: A Review. *Atmosphere*. 2024;15(4): 449. DOI:10.3390/atmos15040449.
  - Jacob DJ, Varon DJ, Cusworth DH, et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022;22(14): 9617–9646. DOI:10.5194/acp-22-9617-2022.
  - Koshelev D. First ground based FTIR-TCCON measurements of CO<sub>2</sub> in a European megacity: comparison with a rural site and validation of satellite measurements [dissertation]. Paris; 2018. 129 p.
  - Nikitenko AA, Timofeev JuM, Berezin IA, et al. Analiz sodержaniya CO<sub>2</sub> vblizi rossijskikh gorodov po sputnikovym izmerenijam OCO-2 [Analysis of CO<sub>2</sub> content near Russian cities using satellite measurements of OCO-2]. *Atmosphere and Ocean Optics*. 2020;33(7): 538–543. (In Russian). DOI:10.15372/AOO20200706.
  - Schultz M, Akimoto H, Bottenheim J, et al. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2015;3: 000067. DOI:10.12952/journal.elementa.000067.
  - Lorente A, Borsdorff T, Martinez-Velarte MC, et al. Evaluation of the methane full-physics retrieval applied to TROPOMI ocean sun glint measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022;15(22): 6585–6603. DOI:10.5194/amt-15-6585-2022.
  - Cooper J, Dubey L, Hawkes A. Methane detection and quantification in the upstream oil and gas sector: the role of satellites in emissions detection, reconciling and reporting. *Environmental Science: Atmospheres*. 2022;2: 9–23. DOI:10.1039/D1EA00046B.
  - Popov NV, Malinnikov VA. Razrabotka statisticheskikh modelej otsenki kontsentratsii metana v prizemnom sloe atmosfery po materialam kosmicheskoy s"emki v zimnij period [Relation of Sentinel-2 multispectral data with surface methane and meteorological observations]. *Vestnik SSUGT*. 2025;30(3): 77–85. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-3-77-85.
  - Kochetkova ED. CO<sub>2</sub> greenhouse gas concentration observations at hydrometeorological observatory (HMO) Tiksi. *Proceedings of the All-Russia research-to-practic conference "Hydrometeorology and atmospheric physics: achievements and development trends", St. Petersburg, March 21–23, 2023*. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Education Institution; 2023: 506–510. (In Russian).
  - Rodionova NV. Korrelyatsiya nazemnykh i sputnikovykh izmerenij kontsentratsii metana v prizemnom sloe atmosfery v rajone Tiksi [Correlation of ground and satellite-based estimates of methane concentration in ground level of atmosphere]. *Earth Research from Space*. 2022;4: 3–11. (In Russian). DOI:10.31857/S0205961422040054.
  - Gordon IE, Rothman LS, Hargreaves RJ, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022;277: 107949. DOI:10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

**AUTHORS** **Nikita V. Popov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Space Monitoring and Ecology, Faculty of Cartography  
 0000-0000-2935-4390

**Vasiliy A. Malinnikov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Space Monitoring and Ecology, Faculty of Cartography  
 Dr. of Sci. (Engineering), Professor  
 0000-0002-8663-755X

**Alexandr I. Nakhutin**

Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia  
Department of Monitoring Greenhouse Gas Emissions in Industry and Energetics  
PhD in Physics and Mathematics

**Submitted: February 06, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.**



# Особенности регионального распределения парниковых газов в зависимости от ландшафтно-географических факторов по материалам космической съемки (на примере Чеченской Республики)

К.В. Мячина<sup>1,2</sup>✉, И.А. Керимов<sup>1</sup>, Р.В. Ряхов<sup>2</sup>, А.Н. Щавелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

<sup>2</sup> Институт степи Уральского отделения Российской академии наук Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Оренбург, Россия

✉ mavicsen@gmail.com

**ЦИТИРОВАНИЕ** Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В., Щавелев А.Н. Особенности регионального распределения парниковых газов в зависимости от ландшафтно-географических факторов по материалам космической съемки (на примере Чеченской Республики) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 45–58. DOI:10.30533/GiA-2025-046.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** диоксид углерода, метан, спутниковые данные, поглотительный потенциал ландшафтов, Чеченская Республика

**АННОТАЦИЯ** Локальные и региональные особенности эмиссии и поглощения парниковых газов, способствующие формированию концентраций последних в атмосфере, являются в настоящее время основными вопросами научной климатической повестки. Регионом исследования стала Чеченская Республика, включающая 12 ландшафтно-географических районов и характеризующаяся территориальной диверсификацией землепользования: на севере, в полупустынной зоне, преобладают пастбища; в северно-центральных и центральных степных районах — распахиваемые земли и урбанизированные территории; южные районы предгорья, низкогорья, среднегорья и высокогорья в основном заняты лесными массивами и луговыми горными пастбищами. Выполнен анализ динамики содержания парниковых газов (диоксида углерода и метана) в атмосфере региона, а также разработана классификация ландшафтов Чеченской Республики по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода на основе спутниковых снимков Sentinel-2, Sentinel-5P, OCO-2. Выявлено, что содержание диоксида углерода в атмосфере региона неравномерно: максимальные значения прослеживаются в северной части, в равнинных степных и полупустынных районах с преобладанием пастбищ; минимальные — на юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах горных лесов и луговых

пастбищ. Максимальные концентрации метана отмечаются в предгорных районах. Наблюдается устойчивый тренд ежегодного роста содержания рассматриваемых парниковых газов в атмосфере. Выделено пять классов ландшафтов, характеризующихся различными уровнями поглотительного потенциала. В северном равнинном полупустынном пастбищном районе процессы эмиссии преобладают над депонированием. В северно-центральных и центральных степных районах, где большую площадь занимают пашни и урбанизированные территории, отмечается незначительный перевес эмиссии над поглощением. Баланс системы «эмиссия — поглощение» в регионе начинается с предгорно-равнинных лесостепных территорий и охватывает южные лесные и луговые горные районы, где депонирование начинает постепенно превалировать над эмиссией.

## 1 Введение

Интенсивное антропогенное воздействие на глобальную экосистему привело к повышению температуры атмосферы за последние несколько десятилетий<sup>1</sup>. Немаловажную роль в этом сыграли и продолжают играть парниковые газы, среди которых одним из основных считается диоксид углерода. Количество диоксида углерода в атмосфере с начала XX века возросло с ~280 до ~416 ppm объемных [1–3]. Основные причины поступления парниковых газов в атмосферу принято связывать со сжиганием ископаемого топлива и сельскохозяйственным землепользованием [4–8]. Глобальная почвенная эмиссия диоксида углерода, происходящая при землепользовании, по некоторым данным, оценивается в 80–100 Гт С · год<sup>-1</sup> [9–11] и составляет 73–91 % валовой первичной продукции всех наземных экосистем (110 Гт С · год<sup>-1</sup>) [12]. Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере напрямую связана с климатическими особенностями территории, типом ландшафта, биологическими особенностями экосистемы, видом и интенсивностью природопользования [13]<sup>2</sup>. Локальные и региональные особенности эмиссии и поглощения диоксида углерода, способствующие формированию его фоновых концентраций, являются в последние годы основными вопросами научной климатической повестки [14].

Задачи данного исследования:

- выявить специфику пространственно-временной динамики ландшафтного покрова (классов землепользования) Чеченской Республики в связке с содержанием парниковых газов (диоксида углерода и метана) в атмосфере;
- выполнить классификацию ландшафтов Чеченской Республики по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода.

## 2 Материалы и методы

Объектом исследования являются ландшафты Чеченской Республики. В ее границах выделяются ландшафтно-географические районы, показанные на рис. 1<sup>3</sup>. Данные районы авторы использовали при расчетах изменения площадей классов землепользования, соотносящихся с содержанием парниковых газов в атмосфере.

1 Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). Geneva: IPCC, 2014. 151 p.

2 Lloyd J., Taylor J. A. On the temperature dependence of soil respiration // Functional Ecology. 1994. Vol. 8. P. 315–323.

3 Районирование выполнено на кафедре экологии и природопользования Научно-исследовательского института геоэкологии и природопользования Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова.

**Рис. 1** ➔

Ландшафтно-географическое районирование территории Чеченской Республики

**Fig. 1**

Landscape and geographical zoning of the territory of the Chechen Republic

**Условные обозначения**

■ участки детальных исследований

□ общая граница полигона

Ландшафтно-экологические зоны

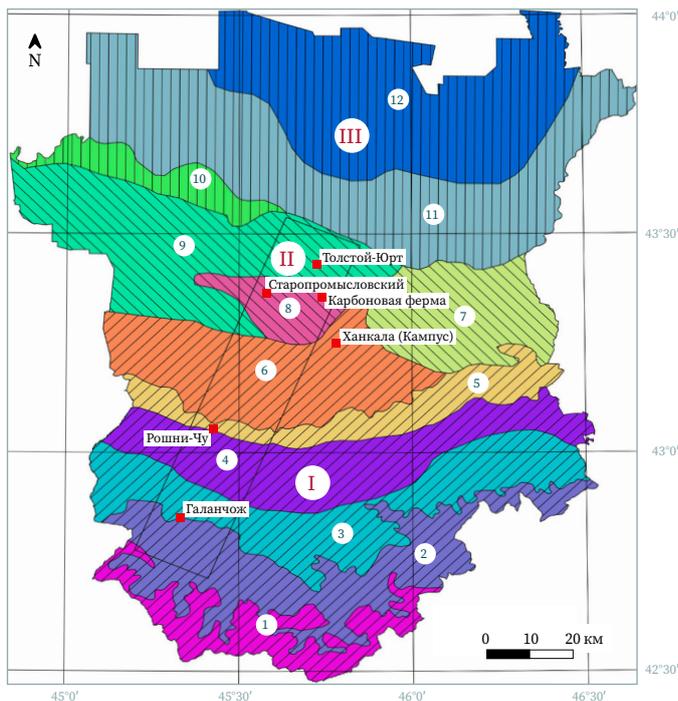
//// I

\\\\ II

|||| III

**Экологические районы**

- 1 — высокогорный нивально-гляциальный
- 2 — высокогорный горно-луговой
- 3 — высокогорный горно-лесной
- 4 — среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
- 5 — низкогорный лесолуговой
- 6 — предгорно-равнинный лесостепной и степной
- 7 — восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
- 8 — центральный равнинно-холмистый степной
- 9 — терско-сунженский холмисто-равнинный степной
- 10 — притеречно-равнинный степной
- 11 — затеречный равнинный степной
- 12 — затеречный равнинный полупустынный



**Рис. 2** ●

Технологическая схема обработки космических снимков для решения задачи классификации ландшафтов Чеченской Республики по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода

**Fig. 2**

Technological scheme for processing satellite images to solve the problem of classifying landscapes of the Chechen Republic according to the level of absorption potential in relation to atmospheric carbon

Анализ ландшафтного покрова выполнялся с помощью свободно распространяемого продукта Esri, основанного на данных Sentinel-2 [15]. Динамический ряд снимков составил 7 лет: с 2017 по 2024 год.

Анализ динамики содержания диоксида углерода в атмосфере исследуемой территории выполнен на основе данных спутника OCO-2 за 2015–2021 годы [16–18]. Для метана аналогичные подсчеты выполнены с помощью снимков спутника Sentinel-5P [18].

Классификация ландшафтов Чеченской Республики по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода основана на интегральной оценке показателя депонирования углерода, полученной авторами ранее [19], и его концентрации в атмосфере. Результатом математических операций со слоями спутниковых продуктов стало классифицированное по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода изображение территории Чеченской Республики.

Технологическая схема обработки космических снимков с указанием полученных результатов представлена на рис. 2.

Используемая спутниковая система (спутник, семейство спутников)	Временной период, за который обработаны данные	Используемый продукт	Подходы к анализу продукта	Результат обработки данных
Sentinel-2	2017–2024 гг.	LULC (Land Use / Land Cover)	Выделение классов землепользования и расчет соотношения их площадей	<ul style="list-style-type: none"> <li>Картограмма</li> <li>Ландшафтный покров в динамике (классы землепользования)</li> <li>Диаграмма</li> <li>Процентное соотношение площадей классов землепользования / ландшафтного покрова</li> </ul>
Sentinel-5P	2018–2023 гг.	CH <sub>4</sub> Total Column (значения ppbv)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Интерполяция данных по сетке в пределах территории региона</li> <li>Расчет многолетних трендов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Картограмма</li> <li>Распределение метана над территорией за исследуемые временные срезы</li> <li>Картограмма</li> <li>Временной тренд метана в атмосфере региона</li> </ul>
OCO-2	2015–2021 гг.	CO <sub>2</sub> Total Column (значения ppm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Интерполяция данных на территорию региона методом изолиний</li> <li>Математические операции с растровыми слоями</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Картограмма</li> <li>Распределение диоксида углерода над территорией (среднее за период)</li> <li>Картограмма</li> <li>Временной тренд диоксида углерода в атмосфере региона</li> <li>Картографическое отображение</li> <li>Классификация ландшафтов по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода</li> </ul>

### 3 Результаты и обсуждение

Ландшафтный покров Чеченской Республики с акцентом на произошедшие за семилетний период изменения показан на рис. 3.

На рис. 4 и в табл. 1 представлены результаты подсчетов площади каждого класса землепользования в ландшафтно-географических районах региона исследования.

**Рис. 3** ↻

Ландшафтный покров (классы землепользования) Чеченской Республики с изменениями за 2017–2024 годы

**Fig. 3**

Landscape cover (land use classes) of the Chechen Republic with changes for the period from 2017 to 2024

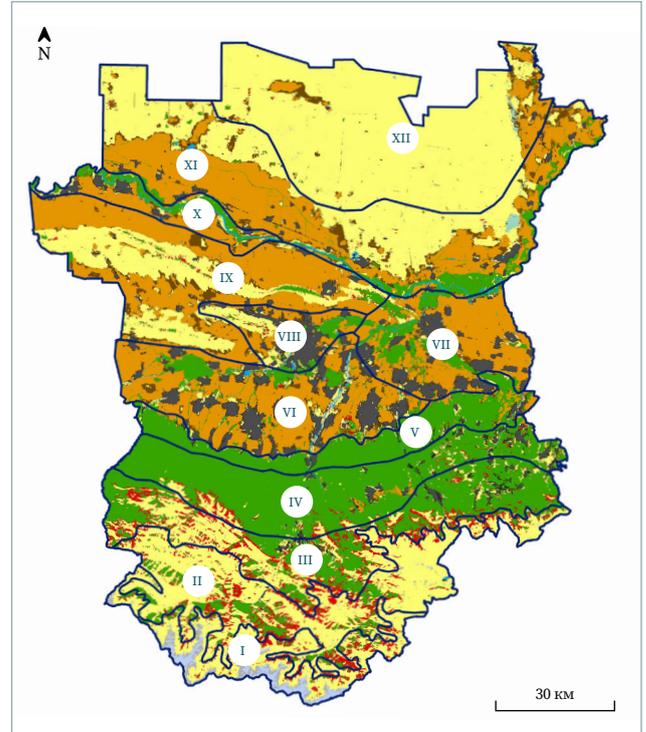
**Условные обозначения**

Классы ландшафтного покрова

- облесенные зоны
- утраченные леса
- распахиваемые сельхозугодья
- залежные земли
- пастбища
- подтопленные территории
- открытая почва
- снег / лед
- застроенные (урбанизированные) зоны
- водные объекты

Ландшафтно-географические районы

- I высокогорный нивально-гляциальный
- II высокогорный горно-луговой
- III высокогорный горно-лесной
- IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
- V низкогорный лесолуговой
- VI предгорно-равнинный лесостепной и степной
- VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
- VIII центральный равнинно-холмистый степной
- IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной
- X притеречно-равнинный степной
- XI затеречный равнинный степной
- XII затеречный равнинный полупустынный

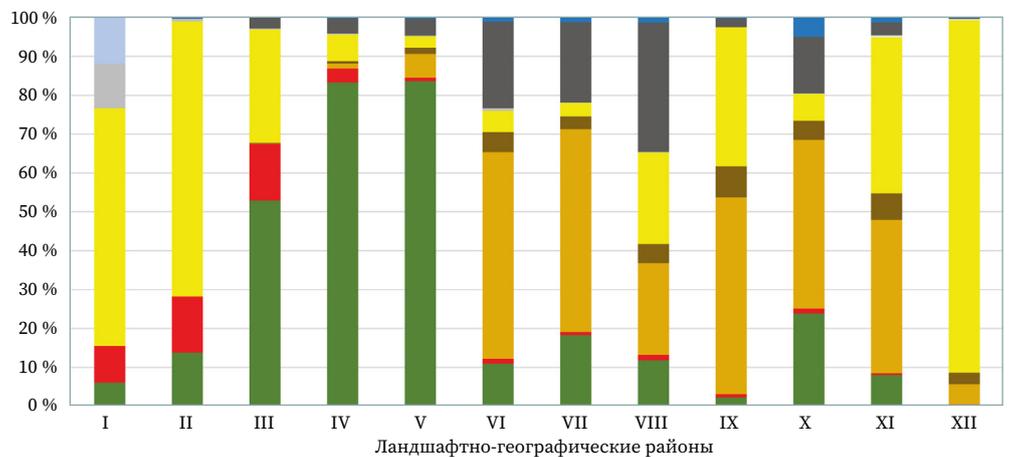


**Рис. 4** ↻

График процентного соотношения площадей классов землепользования / ландшафтного покрова в пределах экологических районов Чеченской Республики

**Fig. 4**

Graph of percentage ratio of areas of land use/landscape cover classes within ecological regions of the Chechen Republic



**Условные обозначения**

Классы ландшафтного покрова

- облесенные зоны
- утраченные леса
- распахиваемые сельхозугодья
- залежные земли
- пастбища
- подтопленные территории
- открытая почва
- снег / лед
- застроенные (урбанизированные) зоны
- водные объекты

Ландшафтно-географические районы

- I высокогорный нивально-гляциальный
- II высокогорный горно-луговой
- III высокогорный горно-лесной
- IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
- V низкогорный лесолуговой
- VI предгорно-равнинный лесостепной и степной
- VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
- VIII центральный равнинно-холмистый степной
- IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной
- X притеречно-равнинный степной
- XI затеречный равнинный степной
- XII затеречный равнинный полупустынный

Таблица 1

Процентное соотношение площадей классов землепользования / ландшафтного покрова в пределах ландшафтно-географических районов Чеченской Республики

Table 1

Percentage ratio of areas of land use / landscape cover classes within the landscape-geographical regions of the Chechen Republic

Ландшафтно-географический район		Класс ландшафтного покрова									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	высокогорный нивально-гляциальный	6,08	9,39	0	0	<b>61,18</b>	0	11,45	11,87	0	0,02
II	высокогорный горно-луговой	13,78	14,43	0	0,03	<b>70,83</b>	0	0,45	0,15	0,16	0,17
III	высокогорный горно-лесной	<b>52,91</b>	14,54	0,09	0,19	29,20	0	0,22	0	2,81	0,03
IV	среднегорно-низкогорный широколиственных лесов	<b>83,24</b>	3,67	1,25	0,59	6,86	0	0,28	0	3,94	0,18
V	низкогорный лесолуговой	<b>83,61</b>	0,95	6,04	1,62	2,88	0	0,25	0	4,33	0,31
VI	предгорно-равнинный лесостепной и степной	10,99	1,21	<b>53,18</b>	5,16	5,48	0	0,64	0	22,28	1,05
VII	восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной	18,33	0,82	<b>52,12</b>	3,30	3,49	0	0,10	0	20,68	1,16
VIII	центральный равнинно-холмистый степной	11,81	1,45	23,58	4,87	23,58	0,11	0,02	0	<b>33,31</b>	1,27
IX	терско-сунженский холмисто-равнинный степной	2,27	0,85	<b>50,65</b>	7,95	35,72	0	0	0	2,38	0,18
X	притеречно-равнинный степной	23,94	1,25	<b>43,30</b>	4,95	6,88	0,14	0,02	0	14,56	4,97
XI	затеречный равнинный степной	8,04	0,44	39,46	6,82	<b>40,15</b>	0,44	0,04	0	3,39	1,22
XII	затеречный равнинный полупустынный	0,25	0,21	5,20	2,98	<b>90,64</b>	0,27	0,09	0	0,26	0,10
% от общей площади		<b>22,11</b>	<b>3,96</b>	<b>23,17</b>	<b>3,55</b>	<b>39,01</b>	<b>0,12</b>	<b>0,72</b>	<b>0,57</b>	<b>6,18</b>	<b>0,61</b>

**Примечание.** Классы ландшафтного покрова обозначены арабскими цифрами: **1** — облесенные зоны, **2** — утраченные леса, **3** — распахиваемые сельхозугодья, **4** — залежные земли, **5** — пастбища, **6** — подтопленные территории, **7** — открытая почва, **8** — снег / лед, **9** — застроенные (урбанизированные) зоны, **10** — водные объекты.

Рис. 3, 4 и табл. 1 позволяют выявить особенности распределения классов землепользования в пределах исследуемого региона. Самая большая площадь облесенных территорий наблюдается в V, IV и III ландшафтно-географических районах, т. е. в низкогорном лесолуговом, высокогорном горно-лесном, среднегорно-низкогорном широколиственных лесов. При этом для I–III ландшафтно-географических районов (все высокогорные) характерны самые быстрые темпы и большие площади исчезновения лесов за семь лет. В ландшафтно-географических равнинных луговых и степных районах (с VI по XI) преобладают распахиваемые сельхозугодья и пастбища в почти равных долях (кроме X района). Наконец, XII район (затеречный равнинный полупустынный) почти полностью состоит из эксплуатируемых пастбищ. Наибольшие площади застроенных (урбанизированных) территорий выделяются в четырех ландшафтно-географических районах: предгорно-равнинном лесостепном и степном (VI), восточном равнинно-холмистом степном и лесостепном (VII), центральном равнинно-холмистом степном (VIII) и притеречно-равнинном степном (X).

Текущее содержание диоксида углерода в атмосфере исследуемой территории, а также его временной тренд за 2015–2021 годы представлены на рис. 5.

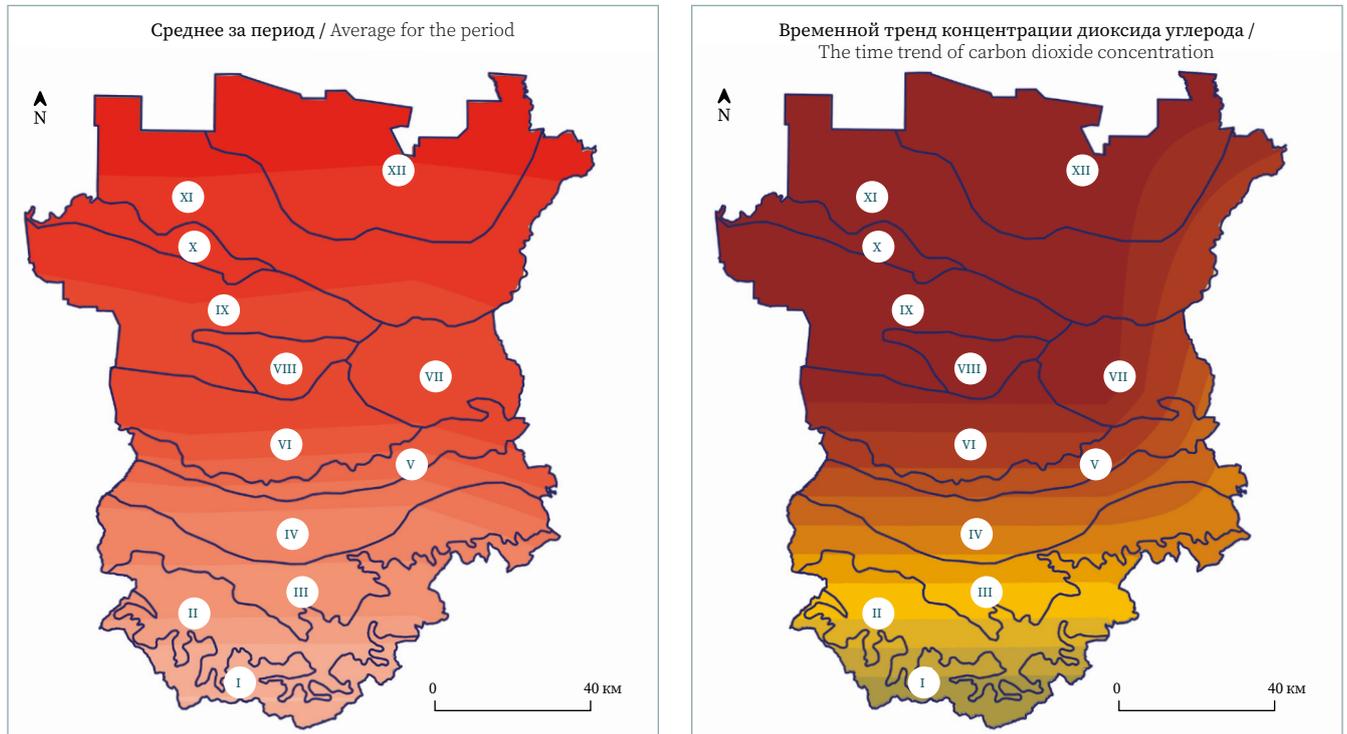
Содержание диоксида углерода в атмосфере региона неравномерно (рис. 5): максимальные значения прослеживаются в северной части, в равнинных полупустынном и степных районах XII, XI, X. Здесь преобладают пастбища и (ближе к центру) пашни. В центральных районах республики концентрации диоксида углерода планомерно снижаются. Здесь преобладают пашни

**Рис. 5**

Распределение диоксида углерода над территорией Чеченской Республики в 2015–2021 годах

**Fig. 5**

Distribution of carbon dioxide concentration over the territory of the Chechen Republic for the period from 2015 to 2021



**Условные обозначения**

<b>CO<sub>2</sub>, %</b>	<b>Ландшафтно-географические районы</b>
0,040 776 – 0,040 781 3	I высокогорный нивально-гляциальный
0,040 77 – 0,040 775 3	II высокогорный горно-луговой
0,040 765 – 0,040 769 4	III высокогорный горно-лесной
0,040 759 – 0,040 763 5	IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
0,040 756 – 0,040 757 6	V низкогорный лесолуговой
0,040 753 – 0,040 754 6	VI предгорно-равнинный лесостепной и степной
0,040 75 – 0,040 751 6	VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
0,040 747 – 0,040 748 7	VIII центральный равнинно-холмистый степной
0,040 741 – 0,040 745 7	IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной
0,040 735 – 0,040 739 8	X притеречно-равнинный степной
0,040 732 – 0,040 733 9	XI затеречный равнинный степной
0,040 726 – 0,040 730 9	XII затеречный равнинный полупустынный
0,040 72 – 0,040 725	

**Условные обозначения**

<b>Тренды CO<sub>2</sub>, %</b>	<b>Ландшафтно-географические районы</b>
0,000 022 – 0,000 022 1	I высокогорный нивально-гляциальный
0,000 021 9 – 0,000 022	II высокогорный горно-луговой
0,000 021 8 – 0,000 021 9	III высокогорный горно-лесной
0,000 021 7 – 0,000 021 8	IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
0,000 021 6 – 0,000 021 7	V низкогорный лесолуговой
0,000 021 5 – 0,000 021 6	VI предгорно-равнинный лесостепной и степной
0,000 021 4 – 0,000 021 5	VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
0,000 021 3 – 0,000 021 4	VIII центральный равнинно-холмистый степной
0,000 021 2 – 0,000 021 3	IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной
0,000 021 1 – 0,000 021 2	X притеречно-равнинный степной
0,000 021 – 0,000 021 1	XI затеречный равнинный степной
	XII затеречный равнинный полупустынный

и урбанизированные территории, но также начинается внедрение густых лесных массивов. И, наконец, на юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах IV, III, II, I содержание диоксида углерода в атмосфере минимально. Здесь наряду с преобладанием смешанных лесов и горных пастбищ выявлены наибольшие площади потерянных лесов на фоне минимальных изменений содержания диоксида углерода за исследуемые 7 лет. При этом в степных и полупустынных районах отмечается существенное увеличение этого показателя (см. карту трендов на рис. 5).

Содержание метана в атмосфере региона по состоянию на 2018 и 2023 годы представлено на рис. 6.

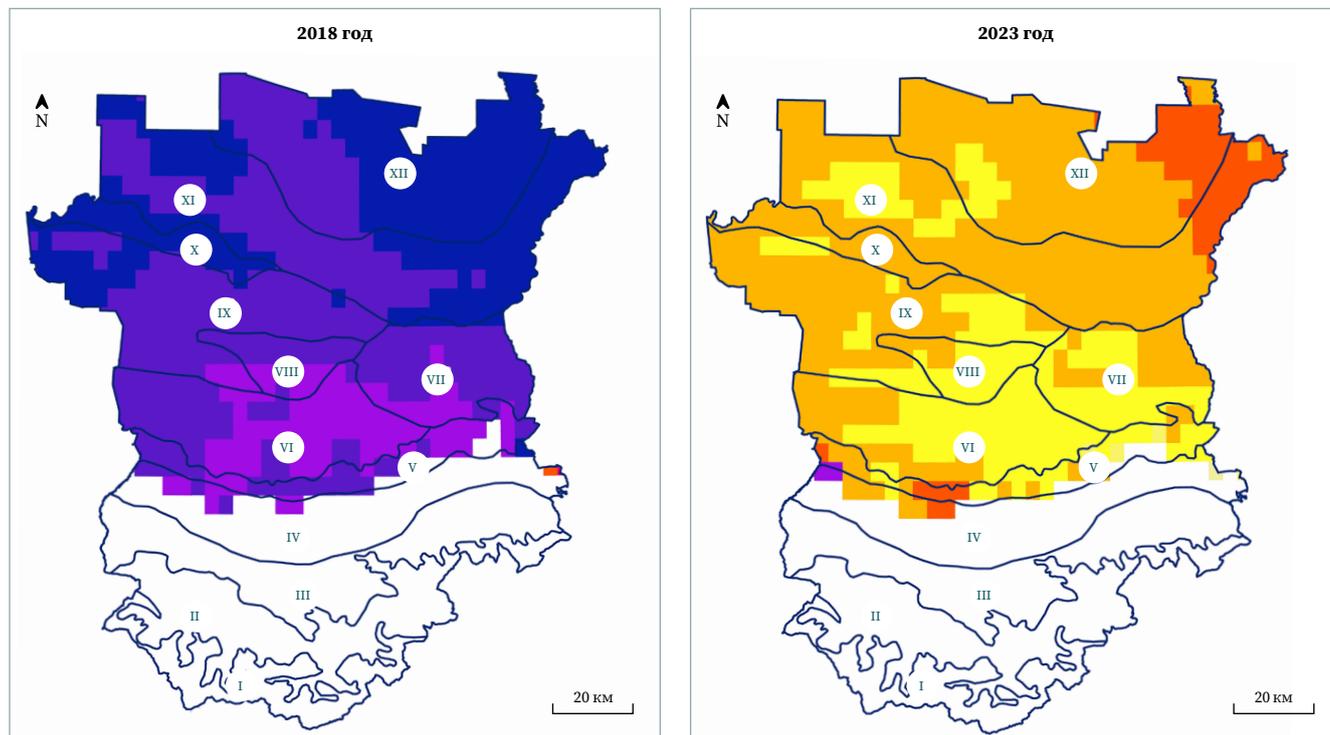
Используемые спутниковые снимки не позволяют получить достоверную информацию о содержании метана в атмосфере горных ландшафтно-географических

**Рис. 6** 

Распределение метана над территорией Чеченской Республики (среднее за 2018 и 2023 годы)

**Fig. 6**

Distribution of methane concentration over the territory of the Chechen Republic (average for 2018 and 2023)



**Условные обозначения**

*CH<sub>4</sub>, ppb*

-  1941–1950
-  1931–1940
-  1921–1930
-  1911–1920
-  1901–1910
-  1891–1900
-  1881–1890
-  1871–1880
-  1861–1870
-  1850–1860

*Ландшафтно-географические районы*

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>I высокогорный нивально-гляциальный</li> <li>II высокогорный горно-луговой</li> <li>III высокогорный горно-лесной</li> <li>IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов</li> <li>V низкогорный лесолуговой</li> <li>VI предгорно-равнинный лесостепной и степной</li> <li>VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>VIII центральный равнинно-холмистый степной</li> <li>IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной</li> <li>X притеречно-равнинный степной</li> <li>XI затеречный равнинный степной</li> <li>XII затеречный равнинный полупустынный</li> </ul> |
|---|---|

районов (в рамках данного исследования это районы IV–I). В доступных для анализа районах выявлен стабильный рост содержания метана в атмосфере за исследуемые 5 лет, а его максимальные значения тяготеют к предгорным зонам и по большей части сосредоточены в предгорно-равнинном лесостепном и степном (VI), восточном равнинно-холмистом степном и лесостепном (VII) ландшафтно-географических районах. Можно предположить, что такое распределение связано либо с концентрацией выпасаемого крупного и мелкого рогатого скота (данное предположение требует подтверждения), либо с особенностями воздушного массопереноса (горы выступают в роли преграды для переноса воздушных масс, что приводит к концентрации примесей [метана] в предгорных районах).

Временной тренд концентрации метана над территорией исследования за 2018–2023 годы представлен на рис. 7.

В доступных для анализа районах V–XII прирост метана за исследуемый шестилетний период относительно равномерен и составляет 51–65 ppb с небольшим превалированием в притеречно-равнинном степном (X) и затеречно-равнинном полупустынном (XII) районах. В то же время анализ ежегодного прироста, отраженного в виде столбчатых диаграмм в точках произвольно заложенной сети, показал, что в 2018–2019 годах наиболее ощутимый прирост объема метана в атмосфере наблюдался на востоке низкогорного лесолугового

**Рис. 7** ↗

Временной тренд концентрации метана в атмосфере Чеченской Республики за 2018–2023 годы

**Fig. 7**

Time trend of methane concentration in the atmosphere of the Chechen Republic for the period from 2018 to 2023

**Условные обозначения**

Диаграмма абсолютного ежегодного прироста объема метана в конкретной точке (CH<sub>4</sub>, ppb)

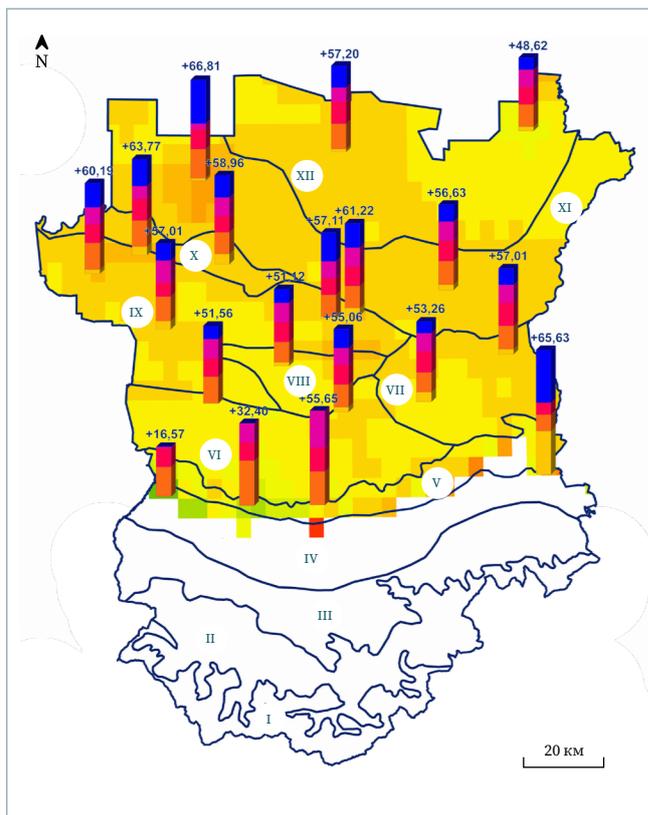
- 2023
- 2022
- 2021
- 2020
- 2019

Общий прирост объема метана (CH<sub>4</sub>, ppb) на территории региона, 2018–2023 гг.

- |       |        |
|-------|--------|
| 0–5   | 51–55  |
| 6–10  | 56–60  |
| 11–15 | 61–65  |
| 16–20 | 66–70  |
| 21–25 | 71–75  |
| 26–30 | 76–80  |
| 31–35 | 81–85  |
| 36–40 | 86–90  |
| 41–45 | 91–95  |
| 46–50 | 96–100 |

Ландшафтно-географические районы

- I высокогорный нивально-гляциальный
- II высокогорный горно-луговой
- III высокогорный горно-лесной
- IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
- V низкогорный лесолуговой
- VI предгорно-равнинный лесостепной и степной
- VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
- VIII центральный равнинно-холмистый степной
- IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной
- X притеречно-равнинный степной
- XI затеречный равнинный степной
- XII затеречный равнинный полупустынный



района (V). Как было сказано выше, это связано либо с особенностями массопереноса, либо с наличием и активным выпасом большого поголовья крупного и (или) мелкого рогатого скота в тот период. С 2019 по 2020 год максимальный прирост объема метана наблюдается в этом же районе, но в его западной части. С 2020 по 2021 год прирост объема метана в атмосфере республики относительно равномерен, однако с 2021 по 2022 год наблюдается его всплеск снова в том же низкогорном лесолуговом районе (V), но уже в его центральной части при отсутствии какого-либо прироста в западной и восточной частях. И, наконец, с 2022 по 2023 год максимальный прирост содержания метана отмечается снова в этом же ландшафтно-географическом районе (V) — в его восточной части при почти полном отсутствии роста концентрации анализируемого газа в западной и центральной частях. Достаточно высокий рост наблюдается также в указанный период на западе затеречного равнинного степного ландшафтно-географического района (XI), что также может говорить о росте поголовья скота.

Классификация ландшафтов Чеченской Республики по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода представлена на рис. 8.

Как видно на рис. 8, в северном равнинном полупустынном районе, где большую площадь занимают пастбища, процессы эмиссии значительно преобладают над улавливанием и депонированием углерода. В северно-центральных и центральных степных районах региона, где доминируют распахиваемые сельхозугодья и урбанизированные территории, отмечается незначительное преобладание эмиссии над поглощением. Баланс системы «эмиссия — поглощение» в регионе устанавливается с предгорно-равнинного лесостепного и степного ландшафтно-географического района VI и распространяется на южные районы, где депонирование постепенно начинает превалировать над эмиссией. Районы низкогорья, среднегорья и высокогорья с преимущественно лесными и горными пастбищными ландшафтами являются наиболее благополучными в отношении улавливания углерода из атмосферы и его долговременного удержания.

**Рис. 8** ➔

Классификация ландшафтов Чеченской Республики по уровню поглотительного потенциала в отношении атмосферного углерода

**Fig. 8**

Classification of landscapes of the Chechen Republic by the level of absorption potential in relation to atmospheric carbon

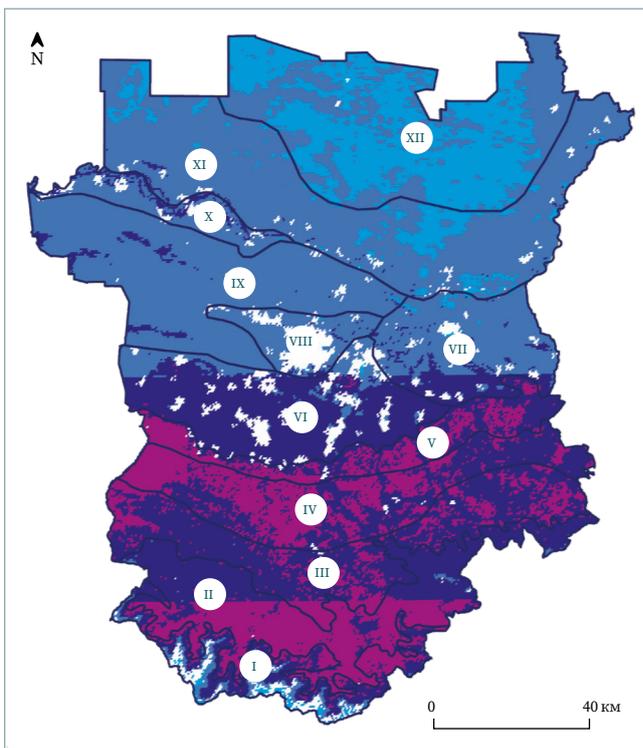
**Условные обозначения**

Классы ландшафтов по уровню поглотительного потенциала

- 1-й класс — максимальное преобладание эмиссии над депонированием (наименее значимые с точки зрения депонирования ландшафты)
- 2-й класс — ландшафты с незначительным преобладанием эмиссии над поглощением
- 3-й класс — срединные значения без явного доминирования одного из показателей
- 4-й класс — преобладание депонирования над эмиссией
- 5-й класс — безразмерные значения, присущие объектам городской инфраструктуры и крупным водным объектам

Ландшафтно-географические районы

- I высокогорный нивально-гляциальный
- II высокогорный горно-луговой
- III высокогорный горно-лесной
- IV среднегорно-низкогорный широколиственных лесов
- V низкогорный лесолуговой
- VI предгорно-равнинный лесостепной и степной
- VII восточный равнинно-холмистый степной и лесостепной
- VIII центральный равнинно-холмистый степной
- IX терско-сунженский холмисто-равнинный степной
- X притеречно-равнинный степной
- XI затеречный равнинный степной
- XII затеречный равнинный полупустынный



## 4 Выводы

Максимальные площади облесенных территорий наблюдаются в горных ландшафтно-географических районах Чеченской Республики. При этом в высокогорных районах отмечаются самые быстрые темпы и большие площади исчезновения лесов за 2017–2024 годы. В равнинных луговых и степных районах преобладают в почти равных долях распахиваемые сельхозугодья и пастбища, кроме крайней северной части региона: она почти полностью состоит из пастбищ.

Максимальные концентрации диоксида углерода отмечаются в северной части республики, в равнинных степных и полупустынном районах, где преобладают пастбища и (ближе к центру) пашни. На юге, в низкогорных, среднегорных и высокогорных районах, концентрации диоксида углерода принимают минимальные значения. В этих же горных районах наблюдаются минимальные изменения содержания диоксида углерода за исследуемые 7 лет. На всей территории республики прослеживается общий тренд постепенного роста содержания диоксида углерода в атмосфере.

Максимальные концентрации метана тяготеют к предгорным ландшафтно-географическим районам. На территории республики наблюдается стабильный рост содержания метана в атмосфере за исследуемый период. Наиболее ощутимый прирост объема метана отмечен в низкогорном лесолуговом районе. Районы низкогорья, среднегорья и высокогорья с преимущественно лесными и горными пастбищными ландшафтами являются наиболее благополучными в отношении улавливания углерода из атмосферы и его долговременного удержания.

**БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена в рамках государственного задания Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова № FZNU-2024-0002.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Nayak N., Mehrotra R., Mehrotra S. Carbon biosequestration strategies: a review // Carbon Capture Science & Technology. 2022. Vol. 4. P. 100065. DOI:10.1016/j.ccs.2022.100065.
  2. Zhao Y., Su Q., Li B., et al. Have those countries declaring “zero carbon” or “carbon neutral” climate goals achieved carbon emissions-economic growth decoupling? // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 363. P. 132450. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132450.
  3. Tang Z., Wang Yu., Fu M., et al. The role of land use landscape patterns in the carbon emission reduction: Empirical evidence from China // Ecological Indicators. 2023. Vol. 156. P. 111176. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.111176.
  4. Hong C., Burney J.A., Pongratz J., et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017 // Nature. 2021. Vol. 589. P. 554–561. DOI:10.1038/s41586-020-03138-y.
  5. Houghton R.A., House J.I., Pongratz J., et al. Carbon emissions from land use and land-cover change // Biogeosciences. 2012. Vol. 9. No. 12. P. 5125–5142. DOI:10.5194/bg-9-5125-2012.
  6. Quere C.L., Raupach M.R., Canadell J.G., et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide // Nature Geoscience. 2009. Vol. 2. No. 12. P. 831–836. DOI:10.1038/ngeo689.
  7. Habib S., Tahir F., Hussain F., et al. Current and emerging technologies for carbon accounting in urban landscapes: Advantages and limitations // Ecological Indicators. 2023. Vol. 154. P. 110603. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110603.
  8. Альферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л. и др. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского и др. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
  9. Borken W., Xu Y.J., Davidson E.A., et al. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests // Global Change Biology. 2002. Vol. 8. P. 1205–1216. DOI:10.1046/j.1365-2486.2002.00547.
  10. Raich J.W., Potter C.S., Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // Global Change Biology. 2002. Vol. 8. P. 800–812. DOI:10.1046/j.1365-2486.2002.00511.x.
  11. Bond-Lamberty B., Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record // Nature. 2010. Vol. 464. P. 579–582. DOI:10.1038/nature08930.
  12. Yuan W., Liu S., Yu G., et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 1416–1431. DOI:10.1016/j.rse.2010.01.022.
  13. Curiel Yuste J., Janssens I.A., Carrara A., et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest // Tree Physiology. 2003. Vol. 23. No. 18. P. 1263–1270. DOI:10.1093/treephys/23.18.1263.
  14. Chatterjee A., Jenerette G.D. Changes in soil respiration Q<sub>10</sub> during drying-rewetting along a semi-arid elevation gradient // Geoderma. 2011. Vol. 163. P. 171–177. DOI:10.1016/j.geoderma.2011.04.003.
  15. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., et al. Global land use / land cover with Sentinel-2 and deep learning // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (July 11–16, 2021). Brussels, 2021. P. 4704–4707. DOI:10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
  16. Metz E.-M., Vardag S.N., Basu S., et al. Soil respiration-driven CO<sub>2</sub> pulses dominate Australia’s flux variability // Science. 2023. Vol. 379. No. 6639. P. 1332–1335. DOI:10.1126/science.add7833.
  17. Nassar R., Hill T.G., McLinden C.A., et al. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from individual power plants from space // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. No. 19. P. 10,045–10,053. DOI:10.1002/2017GL074702.
  18. Chan K.-L., Xu J., Slijkhuis S., et al. TROPOspheric Monitoring Instrument observations of total column water vapour: algorithm and validation // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 821. P. 153232. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.153232.
  19. Мячина К.В., Керимов И.А., Ряхов Р.В. и др. Изучение поглотительной способности ландшафтов в отношении диоксида углерода с помощью ДДЗ (на примере степных, лесостепных и горнолесных регионов юга России) // Геология и геофизика Юга России. 2024. № 14(1). С. 141–151. DOI:10.46698/VNC.2024.41.38.010.

**АВТОРЫ** **Мячина Ксения Викторовна**

ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», Грозный, Россия;  
Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН),  
Оренбург, Россия  
отдел природно-техногенных геосистем  
д-р геогр. наук  
 0000-0001-5190-1421

**Керимов Ибрагим Ахмедович**

ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», Грозный, Россия  
Научно-исследовательский институт геоэкологии и природопользования  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
 0000-0001-9606-3775

**Ряхов Роман Васильевич**

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН),  
Оренбург, Россия  
отдел природно-техногенных геосистем  
 0000-0002-4762-3286

**Щавелев Антон Николаевич**

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН),  
Оренбург, Россия  
отдел природно-техногенных геосистем  
 0000-0002-7249-2193

Поступила 17.03.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликована 29.08.2025.



# Greenhouse gases regional distribution depending on landscape and geographical features based on space survey materials (Chechen Republic as the example)

**Ksenya V. Myachina<sup>1,2</sup>✉, Ibrahim A. Kerimov<sup>1</sup>,  
Roman V. Ryakhov<sup>2</sup>, Anton N. Shchavelev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Grozny State Oil Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

<sup>2</sup> Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia  
✉ mavicsen@gmail.com

**CITATION** Myachina KV, Kerimov IA, Ryakhov RV, Shchavelev AN. Greenhouse gases regional distribution depending on landscape and geographical features based on space survey materials (Chechen Republic as the example). *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 45–58. DOI:10.30533/GiA-2025-046.

**KEYWORDS** carbon dioxide, methane, absorption, deposition, satellite data, landscape absorption potential, Chechen Republic

**ABSTRACT** Local and regional features of greenhouse gas emissions and absorption, contributing to the formation of their concentrations in the atmosphere, have been the main issues of the scientific climate agenda in recent years. The study region is the Chechen Republic, including 12 landscape-geographical regions and characterized by territorial diversification of land use. In the north of the region, in the semi-desert zone, pastures predominate; in the north-central and central steppe regions – arable lands and urbanized territories; the southern areas of the foothills, lowlands, midlands and highlands are mainly occupied by forests and meadow mountain pastures. The objectives of the work are to analyze the dynamics of greenhouse gas (carbon dioxide and methane) content in the atmosphere of the region and to classify the landscapes of the Chechen Republic by the level of absorption potential for atmospheric carbon. Methods: analysis of satellite images Sentinel-2, Sentinel-5P, OCO-2. It was revealed that the content of carbon dioxide in the atmosphere of the region is uneven: the maximum values are traced in the northern part, in the flat steppe and semi-desert areas with a predominance of pastures; the minimum – in the south, in the low-mountain, mid-mountain and high-mountain areas of mountain forests and meadow pastures. The maximum concentrations of methane are noted in the foothills. A stable trend of annual growth of the content of the considered greenhouse gases in the atmosphere

is observed. Five classes of landscapes are distinguished, characterized by different levels of absorption potential. In the northern flat semi-desert pasture region, emission processes prevail over deposition. In the north-central and central steppe regions with a predominance of arable land and urbanized territories, an insignificant predominance of emission over absorption is noted. The balance of the emission-absorption system in the region begins with the foothill-plain forest-steppe territories and covers the southern forest and meadow mountainous regions, where deposition processes gradually begin to prevail over emission.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of GGNTU named after academician M.D. Millionshchikov No. FZNU-2024-0002.

#### REFERENCES

1. Nayak N, Mehrotra R, Mehrotra S. Carbon biosequestration strategies: a review. *Carbon Capture Science & Technology*. 2022;4: 100065. DOI:10.1016/j.ccst.2022.100065.
2. Zhao Y, Su Q, Li B, et al. Have those countries declaring “zero carbon” or “carbon neutral” climate goals achieved carbon emissions-economic growth decoupling? *Journal of Cleaner Production*. 2022;363: 132450. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132450.
3. Tang Z, Wang Yu, Fu M, et al. The role of land use landscape patterns in the carbon emission reduction: Empirical evidence from China. *Ecological Indicators*. 2023;156: 111176. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.111176.
4. Hong C, Burney JA, Pongratz J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017. *Nature*. 2021;589: 554–561. DOI:10.1038/s41586-020-03138-y.
5. Houghton RA, House JI, Pongratz J, et al. Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*. 2012;9(12): 5125–5142. DOI:10.5194/bg-9-5125-2012.
6. Quere CL, Raupach MR, Canadell JG, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*. 2009;2(12): 831–836. DOI:10.1038/ngeo689.
7. Habib S, Tahir F, Hussain F, et al. Al-Ghamdi S.G. Current and emerging technologies for carbon accounting in urban landscapes: Advantages and limitations. *Ecological Indicators*. 2023;154: 110603. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110603.
8. Al'ferov AM, Blinov VG, Gitarskij ML, et al. *Monitoring potokov parnikovyh gazov v prirodnyh jekosistemah* [Monitoring greenhouse gas flows in natural ecosystems]. Zamolodchikova DG, Karelina DV, Gitarskogo ML (eds.). Saratov: Amirit; 2017. 279 p. (In Russian).
9. Borken W, Xu YJ, Davidson EA, et al. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*. 2002;8: 1205–1216. DOI:10.1046/j.1365-2486.2002.00547.
10. Raich JW, Potter CS, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94. *Global Change Biology*. 2002;8: 800–812. DOI:10.1046/j.1365-2486.2002.00511.x.
11. Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*. 2010;464: 579–582. DOI:10.1038/nature08930.
12. Yuan W, Liu S, Yu G, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*. 2010;114: 1416–1431. DOI:10.1016/j.rse.2010.01.022.
13. Curiel Yuste J, Janssens IA, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*. 2003;23(18): 1263–1270. DOI:10.1093/treephys/23.18.1263.
14. Chatterjee A, Jenerette GD. Changes in soil respiration Q10 during drying-rewetting along a semi-arid elevation gradient. *Geoderma*. 2011;163: 171–177. DOI:10.1016/j.geoderma.2011.04.003.
15. Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, et al. Global land use / land cover with Sentinel-2 and deep learning. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (July 11–16, 2021)*. Brussels; 2021: 4704–4707. DOI:10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
16. Metz EM, Vardag SN, Basu S, et al. Soil respiration-driven CO<sub>2</sub> pulses dominate Australia's flux variability. *Science*. 2023;379(6639): 1332–1335. DOI:10.1126/science.add7833.
17. Nassar R, Hill TG, McLinden CA, et al. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from individual power plants from space. *Geophysical Research Letters*. 2017;44(19): 10,045–10,053. DOI:10.1002/2017GL074702.

18. Chan K-L, Xu J, Slijkhuis S, et al. TROPOspheric Monitoring Instrument observations of total column water vapour: algorithm and validation. *Science of The Total Environment*. 2022;821: 153232. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.153232.
19. Mjachina KV, Kerimov IA, Rjahov RV, et al. Izuchenie poglotitel'noj sposobnosti landshaftov v otnoshenii dioksida ugleroda s pomoshh'ju DDZ (na primere stepnyh, lesostepnyh i gornolesnyh regionov juga Rossii) [Study of the absorption capacity of landscapes in relation to carbon dioxide using remote sensing (using the example of steppe, forest-steppe and mountain forest regions of southern Russia)]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2024;14(1): 141–151. (In Russian). DOI:10.46698/VNC.2024.41.38.010.

**AUTHORS** **Ksenia V. Myachina**

Grozny State Oil Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia;  
Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia  
Natural & Technogenic Geosystems Department  
Dr. of Sci. (Geography)  
 0000-0001-5190-1421

**Ibrahim A. Kerimov**

Grozny State Oil Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia  
Research Institute of Geoecology and Nature Management  
Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor  
 0000-0001-9606-3775

**Roman V. Ryakhov**

Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia  
Natural & Technogenic Geosystems Department  
 0000-0002-4762-3286

**Anton N. Shchavelev**

Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia  
Natural & Technogenic Geosystems Department  
 0000-0002-7249-2193

Submitted: March 17, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



# Выявление ряда опасных процессов, угрожающих железнодорожной инфраструктуре на Байкало-Амурской магистрали, на основании данных беспилотных авиационных систем

**М.А. Щеглов<sup>1</sup>✉, А.А. Павловский<sup>1</sup>,  
А.И. Карелов<sup>1</sup>, С.И. Мильштейн<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия  
✉ [mihail\\_sheglov@mail.ru](mailto:mihail_sheglov@mail.ru)

**ЦИТИРОВАНИЕ** Щеглов М.А., Павловский А.А., Карелов А.И., Мильштейн С.И. Выявление ряда опасных процессов, угрожающих железнодорожной инфраструктуре на Байкало-Амурской магистрали, на основании данных беспилотных авиационных систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 59–69. DOI:10.30533/GiA-2025-042.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** беспилотные авиационные системы, железная дорога, многолетнемерзлые породы, цифровая модель рельефа, ортофотоплан

**АННОТАЦИЯ** В настоящее время в различных отраслях активно применяются данные дистанционного зондирования Земли, в том числе данные аэросъемки с беспилотных авиационных систем (БАС). На железнодорожной инфраструктуре аэросъемка с БАС используется в том числе для оценки состояния селевых логов и участков, подверженных деформации из-за деградации многолетнемерзлых пород. В статье показана эффективность применения БАС для мониторинга потенциально опасных участков с применением результатов аэросъемки: цифровых моделей рельефа и ортофотопланов. Установлено, что традиционные методы обследования инфраструктуры не имеют достаточной эффективности при оценке состояния потенциально опасных объектов. В статье описаны исследования с применением аэросъемки с БАС потенциально опасного селевого лога и участка земляного полотна железной дороги, расположенного в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Показана недостаточность информации, получаемой при осмотре селевого лога и защитных сооружений со стороны железнодорожного пути путевыми обходчиками. Продемонстрирована также целесообразность аэросъемки с БАС в тепловом диапазоне для выявления потенциально опасных мест земляного полотна в зонах распространения многолетнемерзлых пород. На основе проведенных

исследований даны рекомендации по совершенствованию системы мониторинга железнодорожной инфраструктуры, включая использование беспилотных летательных аппаратов типа VTOL и проведение дополнительных инженерно-геологических обследований по результатам анализа данных БАС.

## 1 Введение

Сети автомобильных дорог, линий электропередач, продуктопроводов и железных дорог представляют собой сложные пространственно-распределенные инфраструктурные комплексы. Современные методы мониторинга состояния таких комплексов не обходятся без использования геопространственной информации. Она может быть представлена в виде традиционных карт и схем или получивших в последнее время широкое распространение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), к которым относятся данные съемки с космических аппаратов, данные аэросъемки, в том числе с беспилотных авиационных систем (БАС) [1].

Данные ДЗЗ интуитивно понятны и позволяют проводить оценку ситуации и ее динамики как в полосе отвода линейных инфраструктурных объектов, так и в ее окрестностях, особенно в условиях ограниченного доступа (или ограниченного обзора) при осуществлении наземного контроля<sup>1</sup>. Применительно к инфраструктуре железных дорог анализ данных ДЗЗ позволяет получать актуальную, разностороннюю и подробную информацию о застройке и экологической обстановке, о динамике ландшафтных изменений и опасных экзогенных процессах в полосе отвода и на прилегающих территориях. На основании полученных данных могут проводиться учет и контроль объектов железнодорожной инфраструктуры, оценка возможных рисков на потенциально опасных участках и прогнозирование их развития. Использование данных ДЗЗ в комплексе с инженерно-геологическими обследованиями упрощает контроль состояния инженерных сооружений и путей, одновременно улучшая качество проводимых обследований.

В 2009 году была разработана технология мониторинга потенциально опасных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры, включающая использование данных спутниковой съемки. Эта технология позволила на основе спутниковой съемки и наземных обследований провести ландшафтно-геоморфологическое дешифрирование [2] и выполнить линейное зонирование трассы железной дороги — выделить участки, характеризующиеся различными комплексами экзогенных воздействий (склоновых и русловых) и разной степенью опасности этих воздействий на железнодорожную инфраструктуру.

В начале XXI века ускорение технического прогресса привело к революции в области беспилотных технологий, в том числе в авиационной отрасли [3]. Благодаря активному развитию микроэлектроники, микромеханики, связи и двигателестроения стало возможным появление малоразмерных и высокотехнологичных БАС. Одним из самых востребованных направлений гражданского применения БАС является аэросъемка.

С 2018 года технологии БАС активно внедряются в технологические процессы различных подразделений ОАО «РЖД» [4]. В 2021 году была разработана Концепция применения беспилотных авиационных систем при решении задач железнодорожного транспорта (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 455 от 31 марта 2021 года). В рамках ее дальнейшего развития выполняются работы по созданию нормативно-технической документации для различных подразделений железной дороги.

---

<sup>1</sup> Спутниковая информация для задач транспортной отрасли // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2009. № S4. С. 38–39.

В сентябре 2024 года в рамках создания нормативно-технологической документации для нужд Дирекции диагностики и мониторинга инфраструктуры (структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД») (ЦДМ) была проведена тестовая отработка применения БАС для решения некоторых задач по мониторингу опасных процессов, воздействующих на железнодорожную инфраструктуру.

Целью данной работы было установление в подразделениях ЦДМ единого подхода к применению БАС для комплексной диагностики состояния объектов инфраструктуры и прилегающей территории.

## 2 Материалы и методы

При проведении обследований, описанных в статье, применялись БАС мультиторного типа DJI Phantom 4 RTK с интегрированной камерой видимого диапазона и DJI Matrice 300 RTK с блоком полезной нагрузки DJI Zenmuse H20T, включающей камеру видимого и инфракрасного диапазонов. Точность позиционирования беспилотного воздушного судна (БВС) обеспечивалась геодезическим спутниковым приемником DJI D-RTK 2. Обработка полученных материалов проводилась в фотограмметрическом программном обеспечении Agisoft Metashape Professional<sup>2</sup>.

## 3 Результаты и обсуждение

Описанные в статье этапы отработки применения БАС для решения задач ЦДМ проводились на участках Байкало-Амурской магистрали (БАМ).

### 3.1 Обследование селевого лога

#### Рис. 1

Селевой лог на участке Гоуджекит – Дабан Восточно-Сибирской железной дороги (автор фото – М.А. Щеглов)

#### Fig. 1

Torrential flood leader on the Goudzhekit – Daban section of the East-Siberian railway (photo by Mikhail A. Scheglov)



На участке Гоуджекит – Дабан Восточно-Сибирской железной дороги было проведено обследование селевого лога и защитной дамбы. Лог расположен в границах Байкальского хребта и образован временным водотоком. Русло водотока V-образное, с крутыми высокими бортами, каскадное. На всем протяжении русло сложено крупноглыбовым материалом в песчаном и гравийном заполнителе. В русле ручья наблюдаются растущие деревья, густой кустарник, скопления горной породы и поваленных стволов деревьев. По руслу ручья отмечается слабый водоток с дренированием воды по каменной россыпи и под курумом, отмеченным на бортах долины русла. По обеим сторонам долины наблюдаются боковые притоки к ручью (рис. 1).

По данным акта обследования селеопасного участка в 1986 году, по логу произошел сход селя и вынос селевого потока с выходом его к железнодорожному пути. В 1988 году были выполнены

<sup>2</sup> Руководство пользователя Agisoft Metashape: Professional Edition, версия 2.1, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_2\\_1\\_ru.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_ru.pdf) (дата обращения: 02.04.2025).

мероприятия по защите пути от селей: сооружена струенаправляющая дамба объемом 840 м<sup>3</sup>.

Анализ архива космической съемки на данный район показал, что в 2019 году была отсыпана защитная дамба № 7 объемом 153 000 м<sup>3</sup>, площадью по подножию 21 000 м<sup>2</sup>. С 1986 года по логу селевая активность не наблюдалась, и на основании обследования, проведенного в июне 2024 года, данный участок был рекомендован к удалению из Паспорта неустойчивого или деформирующегося земляного полотна (ПУ-9)<sup>3</sup>. Рекомендовано также при ливневых и затяжных дождях устанавливать наблюдения за данным участком силами обходчиков пути.

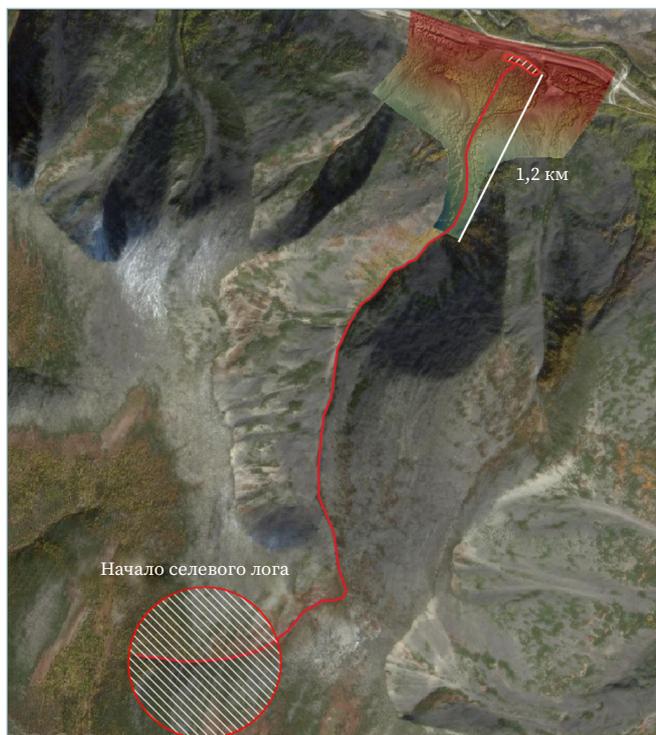
Значительная протяженность селевого лога делает практически невозможным выполнение качественной оценки его состояния, состояния защитной дамбы и селевых накоплений, удаленных от железнодорожного пути, силами обходчиков пути. В связи с этим для мониторинга состояния лога и дамбы целесообразно использовать материалы ДЗЗ, включая аэросъемку с БАС.

Для выполнения эффективного мониторинга селевого лога необходимы результаты обследования территории с БАС, а именно высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР) для анализа общего рельефа местности, конусов выноса селевых потоков и измерения объемов различных объектов, а также ортофотоплан для оцифровки обследуемых объектов, формирования плана местности и плановых измерений (протяженности и площади) [5].

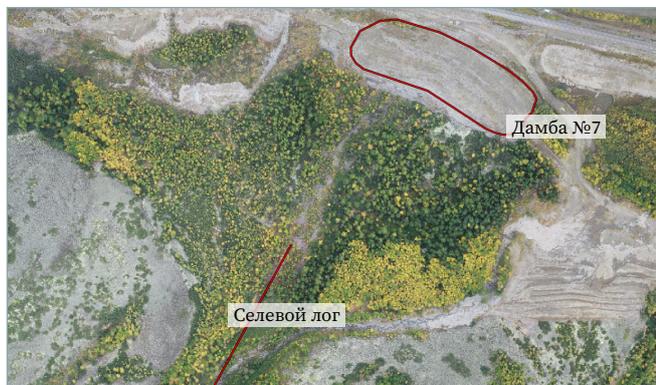
Обследование выполнено БАС DJI Phantom 4 RTK с базовой станцией DJI mobile D-RTK 2, поскольку именно этой системой, отвечающей требованиям Концепции применения беспилотных авиационных систем при решении задач железнодорожного транспорта, на данный момент оснащены подразделения ЦДМ. Для увеличения дальности связи с БВС наземная станция управления (НСУ) и базовая станция были размещены на гребне защитной дамбы № 7 (около 30 м над уровнем железной дороги). Из-за большого перепада высот на полигоне выполнения аэросъемки высота полета БВС была задана 472 м относительно точки взлета. В ходе обследования из-за экранирования сигнала местностью и, как следствие, невозможности передачи корректных поправок между базовой станцией и БВС, а также частичной потери сигнала максимальное удаление БВС от НСУ составило 1,2 км. В связи с этим была обследована только часть лога, тогда как верховья водотока и очаг накопления селевого материала, исходя из анализа данных спутниковой съемки, располагаются существенно дальше по логу на удалении около 4,5 км (рис. 2).

По данным аэросъемки были сформированы ортофотоплан и ЦМР площадью 2 км<sup>2</sup> (рис. 3). Обработка была выполнена в фотограмметрическом программном обеспечении Agisoft Metashape Professional 2.1.1. Пространственное разрешение ортофотоплана и цифровой модели местности составило 12,2 см/пиксель, среднеквадратическое отклонение привязки продуктов — 0,028 м в плане и 0,039 м по высоте.

**Рис. 2**   
Общая схема селевого лога  
**Fig. 2**  
The general scheme  
of the torrential flood leader



**Рис. 3**   
Фрагмент ортофотоплана с отмеченной дамбой № 7  
и селевым логом  
**Fig. 3**  
A fragment of the orthomosaic with a marked dam No. 7  
and the torrential flood leader



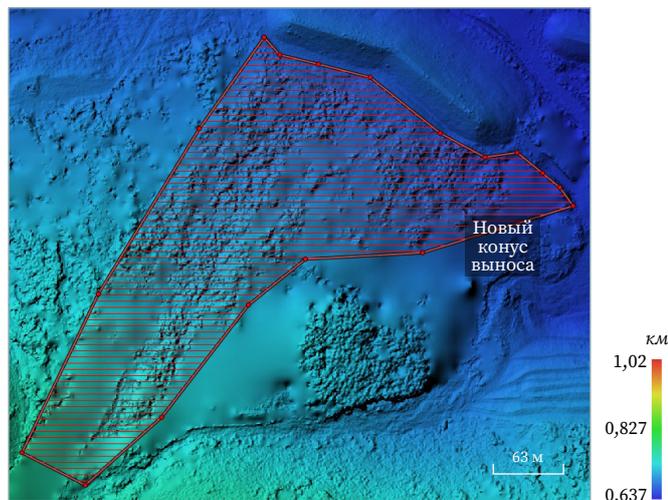
<sup>3</sup> Согласно Памятке по ведению первичной документации в ПЧ (ИЧ) № ЦДИ-2999, утвержденной 17 мая 2021 года главным инженером Управления пути и сооружений ОАО «РЖД» Д.Н. Бурковым.

**Рис. 4** 

Фрагмент ЦМР с конусом выноса последнего селя

**Fig. 4**

A fragment of DEM with the cone of removal of the last mudflow

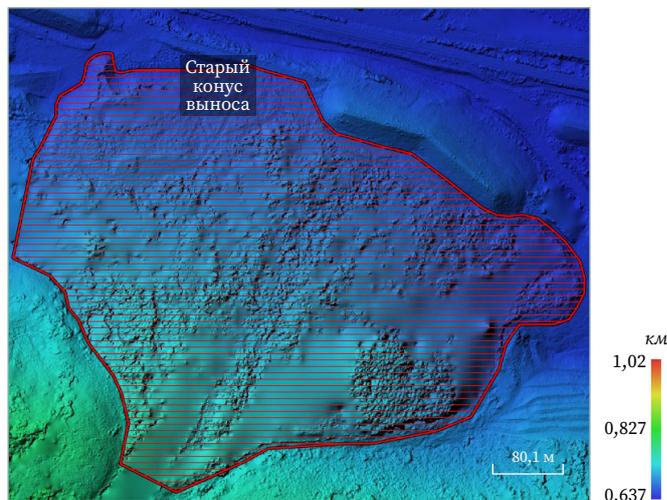


**Рис. 5** 

Фрагмент ЦМР с конусом выноса более старых селей

**Fig. 5**

A fragment of DEM with a cone of removal of older mudflow



**Рис. 6** 

Конус выноса селевого лога, покрытый растительностью (автор фото — М.А. Щеглов)

**Fig. 6**

A cone of torrential flood leader, covered with vegetation (photo by Mikhail A. Scheglov)



Перед началом формирования ЦМР была выполнена классификация и фильтрация плотного облака точек. Построение ЦМР производилось по классу «земля» [6]. Анализ ЦМР показал, что на конусе выноса селевого лога можно выделить отложения последнего сошедшего селя (рис. 4) площадью 66 275 м<sup>2</sup> и объемом 141 859 м<sup>3</sup>, лежащие поверх отложений ранних событий (рис. 5) площадью 181 648 м<sup>2</sup> и объемом 2 104 161 м<sup>3</sup> [7].

При наземном осмотре селеопасного участка границы конуса выноса плохо различимы из-за сложного рельефа местности и древесно-кустарниковой растительности (рис. 6). В то же время на изображениях ЦМР видно, что дамба № 7 защищает железнодорожный путь только на направлении последнего селевого выброса. Если произойдет более мощный вынос селевого материала (подобный более ранним селям), то дамбы № 7 окажется недостаточно, и есть риск выхода селевых масс на железнодорожные пути.

Исходя из выводов, сделанных в результате обследования селевого лога с БАС, целесообразно проведение дополнительного наземного обследования участка специалистами ОАО «РЖД» для оценки рисков и возможного принятия решения о возведении дополнительной защитной дамбы. Чтобы оценить накопление селевых масс и провести мониторинг селевого лога на всем его протяжении, рекомендуется использовать БАС самолетного типа, а в условиях ограниченного пространства для взлета и посадки — БАС самолетного типа с вертикальным взлетом и посадкой (англ. Vertical Take-Off and Landing, VTOL [8]).

### 3.2 Обследование железнодорожной инфраструктуры на территории распространения многолетнемерзлых пород

В рамках тестовой отработки применения БАС для решения задач ЦДМ также было выполнено обследование земляного полотна железной дороги

с применением аэросъемки с БАС в тепловом диапазоне длин волн на участке Тында — Кувыкта.

Обследуемый участок БАМ Дальневосточной железной дороги располагается на территории распространения многолетнемерзлых пород, проходит по долинам рек и пересекается большим количеством водотоков, текущих с нагорной стороны к руслам реки, и, как следствие, подвержен деформациям из-за деградации многолетнемерзлых пород под земляным полотном [9]. В связи с этим он требует постоянного мониторинга для оценки состояния пути.

Из-за значительной протяженности железнодорожного пути на территории распространения многолетнемерзлых пород целесообразно использовать данные аэросъемки, а именно тепловые ортофотопланы, т. к. существующие методы мониторинга состояния железнодорожных путей в условиях вечной мерзлоты носят локальный характер и не позволяют провести оценку их состояния на всей протяженности.

Для выявления повышенного температурного градиента грунта была использована БАС DJI Matrice 300 RTK с тепловизионной камерой Zenmuse H20T и базовой станцией DJI mobile D-RTK 2. В целях исключения теплового фона от поверхностей, нагретых солнечным излучением, аэросъемка выполнялась после их остывания, через два часа после захода солнца. Это позволило отобразить нагретые не за счет инсоляции области более контрастно. Аэросъемка выполнялась вдоль железнодорожного пути в полосе шириной 70 м и протяженностью 1,85 км с высоты 80 м.

В связи с тем, что тепловизионная камера, установленная на БВС, имеет погрешности и не выдает абсолютные значения температуры, был проведен контрольный замер температуры на поверхности земли в точке старта БВС. Замер производился специализированным оборудованием — термометрической косой МЦДТ 0922 (рис. 7<sup>а</sup>).

Затем с высоты выполнения полетного задания над точкой старта был произведен замер температуры с тепловизионной камеры. Полученное расхождение температурных значений между контрольным замером термометрической косой и замером с тепловизионной камеры ( $\Delta t$ ) вводился в качестве поправки при фотограмметрической обработке. В результате сравнения значений замеров  $\Delta t$  составила 9,9 °С.

Обработка была выполнена в фотограмметрическом программном обеспечении Agisoft Metashape Professional 2.1.1. В результате обработки исходных кадров в формате \*.R-JPEG (данный формат фото, содержащий радиометрическую информацию, используется для тепловых камер, т. к. позволяет в процессе постобработки корректировать радиометрические параметры) был получен тепловой ортофотоплан с пространственным разрешением 7 см/пиксель на площадь 0,124 км<sup>2</sup>. Среднеквадратическое отклонение привязки ортофотоплана составило 0,027 м в плане и 0,036 м по высоте (рис. 8).

На тепловом ортофотоплане сильно выделяются две крупные зоны с положительным градиентом температуры около 4,5 °С (рис. 9) относительно окружающего температурного поля.

Расхождение температурных значений между тепловым ортофотопланом и контрольным замером термометрической косой ( $\Delta t_{\text{орто}}$ ) составило 0,4 °С в месте замера, а среднее значение температурного поля на участке съемки — 7,1 °С.

**Рис. 7**   
Портативный контроллер ПКЦД-1/100 от термометрической косы МЦДТ 0922

**Fig. 7**  
Portable controller ПКЦД-1/100 from the thermometer scythe МЦДТ 0922



**Рис. 8**   
Ортофотоплан в тепловом диапазоне, совмещенный со спутниковой съемкой

**Fig. 8**  
Orthomosaic in the thermal range combined with satellite image



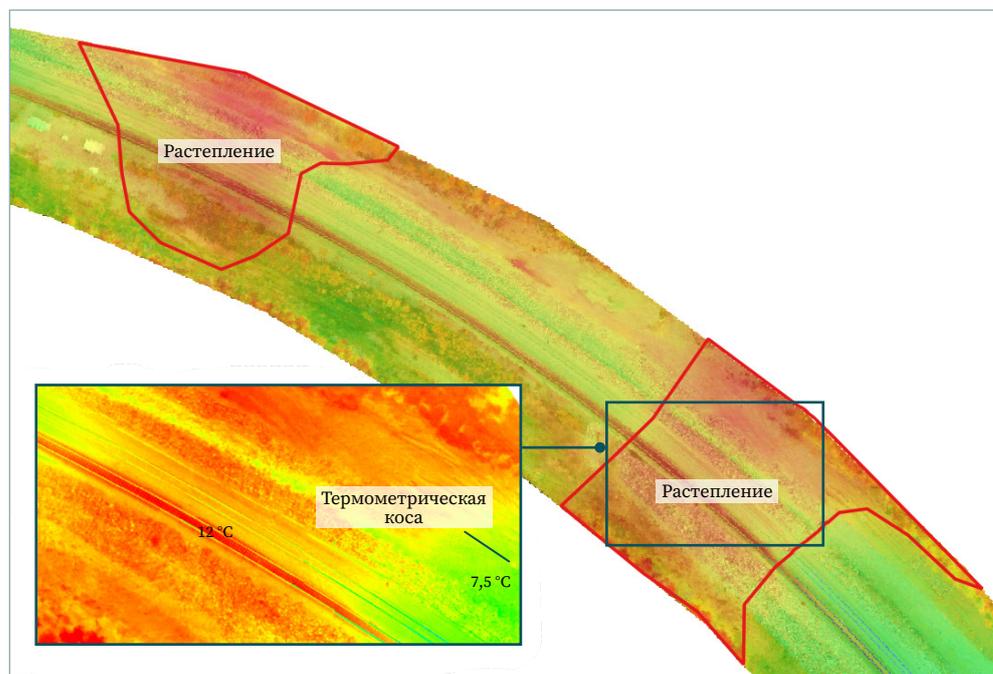
4 ПКЦД-1/100 // Научно-производственное предприятие «Эталон»: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://omsketalon.ru/kontrollery-cifrovyyh-datchikov-portativnye-pkcd-1100> (дата обращения: 02.04.2025).

**Рис. 9** ➔

Температурный градиент  
в районе зоны контрольного  
замера

**Fig. 9**

Temperature gradient in the area  
of the control measurement zone



Таким образом, формирование теплового ортофотоплана в результате аэро­съемки в инфракрасном диапазоне позволяет локализовать места с повышен­ным температурным градиентом и на основании полученных данных сделать вывод о том, что происходит процесс деградации многолетнемерзлых грунтов, их растепление [10] в связи с транзитом влаги под насыпью земляного полотна. Это обусловлено большим количеством водотоков, текущих с нагорной стороны к руслам реки в данной местности. В связи с этим рекомендуется проведение дополнительного наземного инженерно-геологического обследования на выяв­ленных проблемных участках железнодорожного пути.

## 4 Выводы

Таким образом, было установлено следующее:

1. Выполнение аэро­съемки с БАС является эффективным методом реше­ния различных задач подразделений ОАО «РЖД», в том числе в части мониторинга.
2. Проведения осмотра путевыми обходчиками селевого лога и защит­ных сооружений со стороны железнодорожного пути недостаточно для оценки состояния потенциально опасного объекта вблизи желе­знодорожной инфраструктуры.
3. Целесообразно применять материалы аэро­съемки с БАС для обследо­вания селевых логов. Материалы имеют высокую точность (позволяют выделять конусы выноса и определять их объем), дают возможность оценивать достаточность защитных сооружений.
4. Дальность действия связи между БАС мультироторного типа и НСУ недо­статочна для оценки состояния очага накопления селевого материала.
5. Целесообразно применять данные аэро­съемки с БАС в тепловом диа­пазоне для выявления потенциально опасных мест земляного полотна в зонах распространения многолетнемерзлых пород.

Исходя из сделанных выводов, можно рекомендовать:

- для обследования селевых логов применять БАС самолетного типа или типа VTOL (в зависимости от окружающих условий, влияющих

на процесс взлета и посадки БВС), имеющие большой радиус действия связи между БВС и НСУ;

- по результатам анализа данных БАС о территории обследуемых селевых логов проводить дополнительный осмотр участка для оценки рисков и принятия решения о возведении еще одной защитной дамбы;
- по результатам анализа данных БАС об участках, расположенных в зонах распространения многолетнемерзлых пород, проводить адресные подробные наземные инженерно-геологические обследования выявленных проблемных мест.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Брынъ М.Я., Баширова Д.Р., Багишян А.Г. Сравнительная оценка мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с комплексной дорожной лаборатории при выполнении диагностики автомобильных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 2. С. 211–221. DOI:10.20295/1815-588X-2021-2-211-221.
2. Полякова О.А., Проскурня Н.В. Дешифрирование и его назначение // Colloquium-Journal. 2019. № 3-2(27). С. 64–65.
3. Marshall J.A., L'afflito A., Sun W. A survey of guidance, navigation, and control systems for autonomous multi-rotor small unmanned aerial systems // Annual Reviews in Control. 2021. Vol. 52. P. 390–427. DOI:10.1016/j.arcontrol.2021.10.013.
4. Сацок А.В., Воробьев А.А. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2023. № 68. С. 13–21.
5. Aldabergen U., Blagoveshchensky V., Ranova S., et al. Application of unmanned aerial vehicles to obtain morphometric characteristics of landslides // Reliability: Theory & Applications. 2023. No. SI5(75). P. 656–662. DOI:10.24412/1932-2321-2023-575-656-662.
6. Хмельнов А.Е., Гатченко А.С. Разработка цифровых моделей рельефа для мелководных зон и прибрежных территорий озера Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС // География и природные ресурсы. 2022. № 5S. С. 187–195. DOI:10.15372/GIPR20220520.
7. Filkin T., Sliusar N., Huber-Humer M., et al. Estimation of dump and landfill waste volumes using unmanned aerial systems // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 301–308. DOI:10.1016/j.wasman.2021.12.029.
8. Zong J., Zhu B., Hou Zh., et al. Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems // Aerospace. 2021. Vol. 8. P. 256. DOI:10.3390/aerospace8090256.
9. Богданов А.И., Квашук С.В. Динамика изменения геокриологических условий восточного подхода Северомуйского тоннеля // Известия Транссиба. 2024. № 2(58). С. 89–100.
10. Смирнов В.В., Земенков Ю.Д. Проблемы обеспечения надежности эксплуатации сооружений в криолитозоне // Инновации в науке. 2013. № 25. С. 57–65.

#### АВТОРЫ **Щеглов Михаил Александрович**

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия  
отдел спутникового мониторинга  
 0009-0000-2212-5793

#### **Павловский Андрей Александрович**

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия  
канд. техн. наук  
 0009-0005-5666-7538

**Карелов Алексей Игоревич**

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия

Центр внедрения космических технологий

 0009-0005-9533-6483

**Мильштейн Станислав Ильич**

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия

отдел спутникового мониторинга

 0009-0007-7217-7824

Поступила 08.04.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# Identification of a number of hazardous processes threatening railway infrastructure on the Baikal-Amur Mainline based on data from unmanned aerial systems

**Mikhail A. Scheglov<sup>1</sup> ✉, Andrey A. Pavlovsky<sup>1</sup>,  
Alexey I. Karelov<sup>1</sup>, Stanislav I. Milstein<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia

✉ mihail\_sheglov@mail.ru

**CITATION** Scheglov MA, Pavlovsky AA, Karelov AI, Milstein SI. Identification of a number of hazardous processes threatening railway infrastructure on the Baikal-Amur Mainline based on data from unmanned aerial systems. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 59–69. DOI:10.30533/GiA-2025-042.

**KEYWORDS** unmanned aerial systems, railway, permafrost, digital elevation model, orthomosaic

**ABSTRACT** Currently, remote sensing data, including aerial survey data from unmanned aerial systems (UAS), is actively utilized across various industries. In railway infrastructure, UAS-based aerial surveys are employed, among other applications, to assess the condition of debris flow channels and areas prone to deformation due to permafrost degradation. The article demonstrates the effectiveness of UAS for monitoring potentially hazardous sites using aerial survey results: digital elevation models and orthomosaics. It has been established that traditional infrastructure inspection methods lack sufficient efficiency in evaluating the state of potentially hazardous objects. The article describes studies using aerial photography from UAS of a potentially dangerous mudflow and a section of the railway roadbed located in the permafrost zone. The lack of information obtained during the inspection of the mudflow log and protective structures from the railway track by track detourers is shown. The expediency of conducting aerial surveys with UAS in the thermal range to identify potentially dangerous areas of the earthbed in permafrost zones has also been demonstrated. Based on the conducted research, recommendations are provided for improving the railway infrastructure monitoring system, including the use of VTOL (Vertical Take-Off and Landing) unmanned aerial vehicles and additional engineering-geological surveys based on UAS data analysis.

**REFERENCES** 1. Bryn MY, Basharova DR, Bagishyan AG. Comparative assessment of mobile laser scanning, aerial photography with unmanned aerial systems, and surveying with a comprehensive road laboratory for road diagnostics. *Proceedings of Petersburg*

- Transport University*. 2021;18(2): 211–221. (In Russian). DOI:10.20295/1815-588X-2021-2-211-221.
2. Polyakova OA, Proskurnya NV. Deshifirovanie i ego naznachenie [Deciphering and its purpose]. *Colloquium-Journal*. 2019;3-2(27): 64–65. (In Russian).
  3. Marshall JA, L'afflitto A, Sun W. A survey of guidance, navigation, and control systems for autonomous multi-rotor small unmanned aerial systems. *Annual Reviews in Control*. 2021;52: 390–427. DOI:10.1016/j.arcontrol.2021.10.013.
  4. Satcyuk AV, Vorobyov AA. Osobennosti razrabotki bespilotnykh letatelnykh apparatov dlja otrasli zheleznodorozhnogo transporta [Features of development of unmanned aerial vehicles for the railway industry]. *The collection of scientific papers of the Donetsk Railway Transport Institute*. 2023;68: 13–21. (In Russian).
  5. Aldabergen U, Blagoveshchensky V, Ranova S, et al. Application of unmanned aerial vehicles to obtain morphometric characteristics of landslides. *Reliability: Theory & Applications*. 2023;S5(75): 656–662. DOI:10.24412/1932-2321-2023-575-656-662.
  6. Khmel'nov AE, Gatchenko AS. Razrabotka tsifrovyykh modelej relefa dlja melkovodnykh zon i pribrezhnykh territorij ozera Bajkal, Irkutskogo vodohranilischa i nizhnego befa Irkutskoj GES [Development of digital terrain models for shallow water zones and coastal areas of Lake Baikal, Irkutsk Reservoir, and the lower pool of the Irkutsk HPP]. *Geography and Natural Resources*. 2022;5S: 187–195. (In Russian). DOI:10.15372/GIPR20220520.
  7. Filkin T, Sliusar N, Huber-Humer M, et al. Estimation of dump and landfill waste volumes using unmanned aerial systems. *Waste Management*. 2022;139: 301–308. DOI:10.1016/j.wasman.2021.12.029.
  8. Zong J, Zhu B, Hou Zh, et al. Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems. *Aerospace*. 2021;8: 256. DOI:10.3390/aerospace8090256.
  9. Bogdanov AI, Kvashuk SV. Dinamika izmeneniya geokriologicheskikh uslovij vostochnogo podhoda Severomujskogo tonnelja [Dynamics of geocryological conditions changes at the eastern approach to Severomuysky Tunnel]. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024;2(58): 89–100. (In Russian).
  10. Smirnov VV, Zemenkov YD. Problemy obespecheniya nadezhnosti ekspluatatsii sooruzhenij v kriolitozone [Problems of ensuring the reliability of structures operation in the cryolithozone]. *Innovations in Science*. 2013;2: 57–65. (In Russian).

**AUTHORS** **Mikhail A. Scheglov**

Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia  
Satellite Monitoring Department

 0009-0000-2212-5793

**Andrey A. Pavlovsky**

Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia  
PhD in Engineering

 0009-0005-5666-7538

**Alexey I. Karel'ov**

Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia  
Space Technology Implementation Center

 0009-0005-9533-6483

**Stanislav I. Milstein**

Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow, Russia  
Satellite Monitoring Department

 0009-0007-7217-7824

Submitted: April 08, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



# Концепция пространственно-временных явлений

Ю.В. Белышева<sup>1</sup>, О.Г. Гвоздев<sup>1</sup>✉, А.В. Матерухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии,  
Москва, Россия

✉ gvozdev@miigaik.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Белышева Ю.В., Гвоздев О.Г., Матерухин А.В. Концепция пространственно-временных явлений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 70–82. DOI:10.30533/GiA-2025-023.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** пространственно-временные данные, обработка данных, комплексные явления, пространство-время

**АННОТАЦИЯ** Во множестве практически значимых задач, решение которых опирается на пространственно-временные свойства явлений, существенны не столько точно измеренные значения базовых показателей, фактов или пространственных отношений, сколько их интегральная, часто принципиально нестрогая характеристика. В тех областях, где деятельности свойственны такие задачи, сложилась практика интегрального представления последних в виде бинарных, балльных, категориальных и непрерывных шкал. В данной работе предлагается формальный аппарат пространственно-временных явлений, позволяющий учесть аспекты, связанные с ограниченной применимостью понятийных аппаратов базовых предметных областей, аспекты пространственной и временной неопределенности явлений, аспекты принципиально нестрогого определения практически значимых понятий. Предложена человеко-машиночитаемая нотация, основанная на грамматике языка программирования Python 3, позволяющая описывать пространственно-временные явления и потенциально способная служить основой для их автоматической идентификации и локализации. Приведен набор примеров применения данной нотации для определения явлений из области метеорологии. Предложенные построения позволяют унифицировать процессы обработки данных о локализации комплексных явлений в пространстве и времени, в том числе в условиях взаимодействия различных предметных областей.

# 1 Введение

Выбором, определяющим фундаментальные свойства любой информационной, а следовательно, и геоинформационной системы является установление принципов представления информации в ней. Применительно к автоматизированным (аппаратным, аппаратно-программным и программным) информационным системам этот выбор требует определения в том числе используемых машинных типов и структур данных и их соотношений с семантикой обрабатываемой информации.

В современной геоинформатике принято делить весь объем данных на два компонента: пространственный и атрибутивный. При этом репрезентация и обработка пространственного компонента хорошо изучены и формализованы для семейств векторных и растровых представлений. В то же время состав, структура и интерпретация атрибутивного компонента традиционно рассматриваются как исключительно предметно-зависимая часть, не относящаяся к области изучения геоинформатики, а теория и практика построения атрибутивного компонента сводятся к общим принципам, применимым для любых реляционных систем управления базами данных<sup>1,2</sup>.

На практике, однако, нередки случаи, в которых пространственные свойства объектов переносятся в их атрибуты. Наиболее распространенными являются переносы:

- 1) трехмерных свойств объекта в атрибуты двумерного объекта (например, высота здания, высота [глубина] точки рельефа, принадлежность к уровню многоуровневой транспортной развязки);
- 2) агрегированных свойств объекта или пространства вокруг объекта в атрибуты двумерного объекта (например, пороговая величина времени изохрон);
- 3) агрегированных трехмерных свойств объекта в атрибуты двумерного объекта (комбинация предыдущих случаев) (например, средняя высота [глубина] участка местности, описываемого полигоном).

Рассматривая вышеупомянутый пример изохрон, можно отметить, что значение пороговой величины времени изохроны, проходящей через данную точку пространства, не является ни свойством, присущим данной точке, ни свойством явлений в ней, ни свойствами точек пространства, окружающих ее, а выступает эмерджентным свойством окружающей области пространства с пространственными объектами и их атрибутами, а также некоторой функции от них, отражающей свойства и потребности потребителя информации.

В большом количестве практически значимых задач, решение которых так или иначе предполагает привлечение пространственных и пространственно-временных данных, а также инструментов пространственного (геоинформационного) анализа, существенными являются не точно измеренные значения физических величин или пространственных отношений, а их интегральная, часто принципиально нестрогая характеристика. Так, запрос «в пешей доступности от станции метрополитена» не может быть выражен в виде конкретных количественных требований. Более того, попытка выразить подобные запросы в строгой форме неизбежно приведет к потере важных деталей и, как следствие, ухудшению общего качества результата обработки запроса.

Аналогичную проблему можно отметить в отношении запроса «на маршруте имеются затруднения движения». Такое явление, как гололед (обледенение), может образовываться вследствие намерзания капель переохлажденной воды (дождя, мороси или тумана) либо при соприкосновении капель воды

1 Haerder T., Reuter A. Principles of transaction-oriented database recovery // ACM Computing Surveys. 1983. Vol. 15. No. 4. P. 287–317.

2 Kent W. A Simple guide to five normal forms in relational database theory // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. P. 120–125.

с предметами, температура поверхности которых не превышает  $0^{\circ}\text{C}$ <sup>3</sup>. Это явление выступает примером единого результирующего состояния (представляющего интерес для практики), ставшего следствием различных процессов.

Наиболее часто для решения практически значимых задач ценностью представляет именно идентификация и пространственно-временная локализация явления, а не точные значения отдельных физических величин, необходимые для его идентификации. Более того, точность пространственно-временной локализации в этом случае намного важнее.

Цель данной работы — предложить формальный аппарат, расширяющий теоретический и прикладной инструментарий геоинформатики в части единого образного представления пространственно-временных сведений (и оперирования ими), полезность которых состоит в идентификации и пространственно-временной локализации явлений, но не в отдельных фактах и величинах, исходных для процессов идентификации и локализации.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Разработка формального аппарата пространственно-временных явлений

В данной работе предлагается формальный аппарат пространственно-временных явлений, представляющий собой попытку обобщить существующие теоретические построения и потребности практики. Под пространственно-временным явлением в рамках статьи понимается явление, полезность сведений о котором заключается главным образом в его пространственно-временной локализации. Таким образом, переход от множества исходных показателей к показателю некоторого пространственно-временного явления с точки зрения построения информационных систем — это абстрагирование сложности, присущей предметной области, в пользу обеспечения простоты и удобства анализа в пространственном или пространственно-временном домене. Уже упомянутые изохроны [1] являются ярким примером такого перехода, как и многие другие градостроительные метрики [2]. При изучении комплексных процессов и явлений, протекающих в пространстве и времени, вводятся индексы стабильности атмосферы<sup>4</sup> [3], индексы токсичности почвы [4, 5] и т. д. В практике метеорологических наблюдений активно применяются категориальные [6] (состояние подстилающей поверхности без снежного покрова и при наличии снежного покрова, структура и характер залегания снежного покрова, классификация ярусов и видов облачности) и балльные (степень покрытия неба облаками [10-балльная шкала, шкала METAR<sup>5</sup>], сила ветра [шкала Бофорта]<sup>6</sup>) системы кодирования<sup>3</sup>. Таким образом, становится очевидной общая тенденция к представлению данных о состоянии явлений в виде бинарных, категориальных или непрерывных шкал в  $[0; 1]$  либо в видах, легко приводимых к перечисленным. Предложенная концепция является попыткой унификации данных подходов для их дальнейшего применения в рамках аппарата пространственного анализа.

3 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 3. Ч. 1. 297 с.

4 Mohan M., Siddiqui T.A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification // Atmospheric Environment. 1998. Vol. 32. No. 21. P. 3775–3781.

5 METeoroological Aerodrome Report (METAR). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://awiacja.imgw.pl/pdf/metar-en.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).

6 Huller S. Defining the wind: the Beaufort scale and how a 19th-century admiral turned science into poetry. New York: Crown Publishers, 2004. 290 p.

Среди опубликованных в открытых источниках исследований по смежным тематикам можно отметить следующие. В работе [7] предложена адаптация математического аппарата нестрогой логики для формализации пространственных запросов. В статье [8] детально проработаны вопросы изменчивости пространственных признаков во времени и ее учета в геоинформационной системе. В работе [9] предложен подход ко встраиванию знаний о пространственных и атрибутивных свойствах объектов в латентное признаковое пространство для их дальнейшей обработки с помощью моделей на основе искусственных нейронных сетей.

Ключевым отличием предлагаемой статьи от перечисленных является нацеленность на введение способа абстрагирования процессов представления данных потребителю и интегральной обработки данных различных предметных областей от процессов идентификации и локализации явлений, представляющих интерес.

## 2.2 Определение понятия пространственно-временного явления

Пространственно-временное явление — явление, для которого каждой точке пространства можно поставить в соответствие показатель пространственно-временного явления  $P(x)$  — совокупное значение трех предикатов:

- применимости  $P_A(x)$  (Применим ли понятийный аппарат, в котором определено явление в данной точке?);
- определенности  $P_D(x)$  (Достаточно ли данных для определения состояния явления в данной точке?);
- значения  $P_V(x)$  (Происходит ли явление в данной точке?).

При этом совокупное значение трех предикатов определяется по следующим правилам:

- 1) если предикат применимости  $P_A(x) = False$ , значение явления в данной точке *NotApplicable* («неприменимо»);
- 2) если предикат определенности  $P_D(x) = False$ , значение явления в данной точке *NotAvailable* («недоступно»);
- 3) если  $P_A(x) \wedge P_D(x)$ , значение явления в данной точке соответствует  $P_V(x)$ , где  $x$  — пространственное или пространственно-временное положение точки.

Таким образом, показатель пространственно-временного явления принимает значения из множества  $\{NotApplicable, NotAvailable, False, True\}$  ( $\{NAP, NAV, F, T\}$ ). Выполнение логических операций над данным множеством значений производится согласно таблицам истинности (табл. 1–3).

**Таблица 1** ⌵

Таблица истинности операции отрицания на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 1**

Truth table of negation on the values of the index of spatio-temporal phenomena

¬	
<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>
<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>
<i>False</i>	<i>True</i>
<i>True</i>	<i>False</i>

**Таблица 2** ⌵

Таблица истинности операции конъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 2**

Truth table of conjunction on the values of the index of spatio-temporal phenomena

∧	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	<i>True</i>
<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>
<i>NotAvailable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>
<i>False</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	<i>False</i>
<i>True</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	<i>True</i>

**Таблица 3** ⌵

Таблица истинности операции дизъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 3**

Truth table of disjunction on the values of the index of spatio-temporal phenomena

∨	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	<i>True</i>
<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>
<i>NotAvailable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>
<i>False</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	<i>True</i>
<i>True</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>True</i>	<i>True</i>

Данное построение можно рассматривать как расширение классической бинарной логики и как частный случай многозначной, в частности конечнозначной, логики (англ. many-valued logic, multiple-valued logic)<sup>7,8</sup>.

Явное выделение значений *NotApplicable* и *NotAvailable* необходимо как для обеспечения строгости (однозначности) при обработке, организации сбора и хранения данных, так и для рационализации вычислительных процессов, что возможно ввиду того, что точки со значениями *NotApplicable* и *NotAvailable* будут изменяться значительно реже, нежели точки, для которых значения определены.

## 3 Результаты и обсуждение

### 3.1 Обобщение для протяженных объектов

Предложенное определение применимо лишь к отдельным точкам пространства. Для его использования совместно с аппаратом пространственного анализа необходимо определить его обобщение для объектов, протяженных в пространстве и (или) времени.

В данном случае под объектами, протяженными в пространстве, понимаются общепринятые пространственные примитивы, определенные в рамках стандарта Open Geospatial Consortium Simple Feature Access<sup>9</sup>, а при включении в рассмотрение временной координаты к таковым можно отнести также одномерные объекты (точки).

Традиционной интерпретацией физических величин, выступающих атрибутами протяженных пространственных объектов, является их математическое ожидание в заданной площади или объеме и (или) за определенный временной интервал. Для логических величин оно будет соответствовать вероятности истинного значения.

Данное определение может быть применено непосредственно путем определения вероятности значения *True*. Однако такая операция приведет к потере сведений о значениях *NotApplicable* и *NotAvailable*, что может быть желательно в отдельных случаях, но не может считаться строгим и корректным способом обработки данных.

В связи с этим определим операцию вычисления математического ожидания показателя пространственного явления в виде следующих правил:

1. Если  $M(P_A M(P_A(x))) > T$ , где  $T$  — пороговое значение, следует считать результирующим значением *NotApplicable*.
2. Если  $M(P_A(x) \wedge P_D(x)) > T$ , следует считать результирующим значением *NotAvailable*.
3. Иначе следует считать результирующим значением  $M(P_V(x))$  для  $x$ , где  $\neg(P_A(x) \vee P_D(x))$ .

Таким образом, результаты вычисления  $M(P(x))$  будут находиться во множестве  $\{NotApplicable, NotAvailable, [0.0; 1.0]\}$ .

Пороговое значение  $T$  должно определяться в зависимости от особенностей предметной области, задачи, а также типа пространственного объекта, для которого производится расчет. Рекомендуемыми значениями  $T$  являются:

- 0,0 — наиболее строгий вариант;

7 Augusto L.M. Many-valued logics. A mathematical and computational introduction. London: College Publications, 2017. 340 p.

8 Bergmann M. An introduction to many-valued and fuzzy logic: semantics, algebras, and derivation systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 329 p.

9 Simple Feature Access. Part 1: Common Architecture. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ogc.org/publications/standard/sfa/> (дата обращения: 08.10.2024).

– 0,5 — компромиссный вариант между строгостью и сохранением данных.

Наиболее распространенными частными случаями типов объектов, для которых производится такой расчет, будут полигон (мультиполигон) и пиксел раstra. Полигональное представление используется в случаях, когда каждому полигону соответствует некая область пространства, важная с точки зрения предметной области: единица административно-территориального деления или землепользования, реже — области пространственно-временной эквивалентности, для которых предполагается относительно низкий разброс значений. В этом случае пренебрегать отдельными полигонами нежелательно, что подразумевает применение более разрешительных значений  $T$ . При использовании растрового представления, напротив, значениями отдельных пикселей, как правило, можно пренебречь в пользу общей полноты и корректности, а также минимизации «шумовых» значений.

Важно отметить, что в отечественной практике распространен более близкий к физике подход, основанный на использовании геопривязанных полей — геополей (англ. geofield), расширяющих понятие полей физических явлений, машинным представлением которых выступают растры на регулярной сетке. В зарубежной литературе используется более общий термин distribution map («карта распределения»), приближенный к практике географии и картографии, включающий в себя представления, основанные как на растрах, так и на полигонах.

Результатом объединения аппарата пространственных явлений с аппаратом геополей являются геополя пространственных явлений и временные ряды геополей пространственных явлений, а результатом объединения аппарата пространственных явлений с аппаратом карт распределения, в свою очередь, — карты распределения пространственных явлений и их временные ряды.

### 3.2 Обобщение для нечеткой логики

Как было показано во введении, корректное решение ряда практически значимых задач не может быть получено в рамках аппарата бинарной логики. Преодолению этого ограничения посвящено множество исследований, рассматривающих обобщения бинарной логики до бесконечнозначной логики<sup>10</sup> [10], предполагающей оперирование значениями на отрезке [0; 1]. Одним из таких обобщений, активно используемым в информатике и автоматизации, является нечеткая (англ. fuzzy) логика<sup>10</sup>.

Численно данный подход полностью совместим с предложенным. Учет значений *NotApplicable* и *NotAvailable* предлагается осуществлять путем введения таблиц истинности, представленных ниже (табл. 4–6).

Важно отметить, что существует множество трактовок значений, промежуточных между *False* = 0 и *True* = 1: частотная, используемая для описанного обобщения для протяженных объектов; байесовская, предполагающая оценку уверенности в истинности высказывания; нечеткая (из нечеткой логики), предполагающая оценку степени принадлежности значения некоторому множеству (лингвистической переменной), и др. Несмотря на их численную совместимость, нельзя вне конкретного частного случая говорить об их семантической эквивалентности или совместимости.

Исследование этого вопроса выходит за границы данной работы. В рамках предлагаемого обобщения в связи с необходимостью обеспечить совместимость с аппаратом пространственного анализа основной следует считать интерпретацию, предполагающую частотную трактовку вероятности. В случаях, для которых теоретически или эмпирически выявлена семантическая несовместимость с этой трактовкой, авторы предлагают исследовать возможности применения передаточных функций.

**Таблица 4** ▼

Таблица истинности операции отрицания на значениях показателя пространственно-временных явлений, обобщенная для нестрогой логики

**Table 4**

Truth table of negation on values of the index of spatio-temporal phenomena generalized for non-strict logic

¬	
<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>
<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>
<i>False</i>	<i>True</i>
(0; 1)	1 – x
<i>True</i>	<i>False</i>

10 Zadeh L.A. A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges // Journal of Cybernetics. 1972. Vol. 2. No. 3. P. 4–34.

**Таблица 5** 

Таблица истинности операции конъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 5**

Truth table of conjunction on values of the index of spatio-temporal phenomena generalized for non-strict logic

$\wedge$	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	(0; 1)	<i>True</i>
<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>
<i>NotAvailable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>
<i>False</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	<i>False</i>	<i>False</i>
(0; 1)	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	$xy$	$y$
<i>True</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	$x$	<i>True</i>

**Таблица 6** 

Таблица истинности операции дизъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений, обобщенная для нестрогой логики

**Table 6**

Truth table of disjunction on values of the index of spatio-temporal phenomena generalized for non-strict logic

$\vee$	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	(0; 1)	<i>True</i>
<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotApplicable</i>
<i>NotAvailable</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>NotAvailable</i>
<i>False</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>False</i>	$x$	<i>True</i>
(0; 1)	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	$y$	$x + y - xy$	<i>True</i>
<i>True</i>	<i>NotApplicable</i>	<i>NotAvailable</i>	<i>True</i>	<i>True</i>	<i>True</i>

### 3.3 Формализация способа описания пространственных и пространственно-временных явлений

Результативное использование предложенного теоретического аппарата невозможно без человеко-машиночитаемого способа записи — нотации, определяющей зависимость значения показателя пространственного явления в текущей точке от значений переменных в ней и ее окрестности.

В качестве синтаксической основы предлагается использовать язык программирования Python 3, в частности следующие его конструкции:

- 1) переменные;
- 2) выражения, включающие в себя:
  - вызовы функции, в том числе с именованными аргументами;
  - унарные и бинарные логические операторы;
  - арифметические операторы;
  - операторы сравнения.

Для удобства выполнения логических операций предлагается ввести функции:

- 1)  $\text{allof}(a, b, c, \dots)$  — обобщение операции И для произвольного числа аргументов;
- 2)  $\text{anyof}(a, b, c, \dots)$  — обобщение операции ИЛИ для произвольного числа аргументов.

Для обращения к значениям исходных переменных предлагается ввести следующие функции:

- 1)  $\text{exact}(X)$  — значение переменной  $X$  строго в текущей точке; принимает значение *NotAvailable*, если непосредственно в текущей точке значение отсутствует;
- 2)  $\text{nearest}(X, r = R, t\_past = T)$  — значение переменной  $X$  непосредственно в текущей точке либо ближайшее значение в пространстве на расстоянии, не превышающем  $R$ , не более чем на  $T$  ранее текущего момента времени; принимает значение *NotAvailable*, если подходящие значения отсутствуют;
- 3)  $\text{interpolate}(X, r = R, t\_past = T, n = N, \text{order} = \text{ORDER})$  — значение переменной  $X$  непосредственно в текущей точке либо значение, полученное путем интерполяции не более  $N$  известных значений, на расстоянии,

не превышающем  $R$ , не более чем на  $T$  ранее текущего момента времени; при этом порядок ORDER может принимать значение:

- 0 — выбор ближайшего значения (аналогично nearest);
  - 1 — применение билинейной интерполяции;
  - 2 — применение биквадратной интерполяции;
  - 3 — применение бикубической интерполяции;
- 4) `aggregate( X, spatial_window, temporal_window, operation )` — значение переменной  $X$ , агрегированное с помощью операции `operation` для пространственного окна, установленного параметром `spatial_window`, и временного окна, установленного параметром `temporal_window`, где `spatial_window` — функция, определяющая вес значения в зависимости от расстояния (или разности отдельных координат) до него, а `temporal_window` — функция, определяющая вес значения в зависимости от времени до него (от текущего момента в прошлое).

**Для обработки нестрогих логических значений предлагается ввести функции:**

- 1) `linear( left_condition, right_condition )` — построение кусочно-линейной функции вида

$$1 \quad f(x) = \begin{cases} 0, & x < left\_condition, \\ 1, & x > right\_condition, \\ \left( \frac{x-left\_condition}{right\_condition-left\_condition} \right), & left\_condition \leq x \leq right\_condition; \end{cases} \quad L$$

- 2) `trapezoidal( left_condition, left_center_condition, right_center_condition, right_condition )` — построение кусочно-линейной функции вида

$$2 \quad f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq left\_condition, \\ \left( \frac{x-left\_condition}{right\_condition-left\_condition} \right), & left\_condition < x < left\_center\_condition, \\ 1, & left\_center\_condition \leq x \leq right\_center\_condition, \\ \left( 1 - \frac{x-left\_condition}{right\_condition-left\_condition} \right), & right\_center\_condition < x < right\_condition, \\ 0, & x > right\_condition. \end{cases}$$

Практическое применение этой нотации базируется на формировании оптимизированных реализаций предикатов применимости, определенности и значения путем трансформации нотации в абстрактное синтаксическое дерево, выполнения символьных алгебраических преобразований над ним, трансформации полученных выражений в последовательности вычислительных операций, преобразуемых, в свою очередь, в байт-код виртуальной машины или непосредственно инструкции процессора.

### 3.4 Примеры применения нотации

В качестве примеров применения предлагаемой нотации можно рассмотреть формализацию ряда распространенных метеорологических явлений.

Для всех приведенных далее выражений определим:

```
# Функция вычисления среднего на расстоянии до 20 метров
от данной точки за последние 30 секунд:
around = lambda X: aggregate( X, meters( 20 ),
seconds( 30 ), average )
```

Например, опираясь на температуру и размер частиц, а также на интенсивность выпадения, можно определить дождь и морось<sup>11</sup> так, как указано

<sup>11</sup> Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 3. Ч. 1. 297 с.

**Таблица 7** 

Выражения для определения пространственно-временных явлений

**Table 7**

The expressions to define spatio-temporal phenomena

в строках 1–2 табл. 7. Аналогично, используя количество частиц на м<sup>3</sup>, можно установить различные виды интенсивности снегопада [11] (строки 3–6 табл. 7). Сложнее определить, можно ли назвать мокрым снегом явление, отличающееся наличием теплого приземного слоя воздуха<sup>12</sup> (строка 7 табл. 7). Еще более сложным для определения является отмеченный в начале работы гололед, поскольку его образование может протекать различными путями<sup>13</sup> [11] (строка 8 табл. 7).

На практике главной сложностью применения предложенной нотации является формализация явлений в терминах известной на данном этапе работы системы значений, что требует достаточно глубокого понимания предметной области и процессов получения измерений.

Атмосферные осадки		Выражение
1.	Морось	<code>allof(         ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &gt; celsius( 0 ) ),         ( around( mm( РазмерЧастиц ) ) &lt; mm( 0.5 ) ),         ( around( mm_per_hour( Интенсивность ) ) &gt; mm_per_hour( 0.25 ) ),         )</code>
2.	Дождь	<code>allof(         ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &gt; celsius( 0 ) ),         ( mm( 0.5 ) &lt; around( mm( РазмерЧастиц ) ) &lt; mm( 7.0 ) ),         ( mm_per_hour( 0.25 ) &lt; around( mm_per_hour( Интенсивность ) ) &gt; mm_per_hour( 100 ) ),         )</code>
3.	Снегопад. Слабый	<code>allof(         ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ),         ( around( count( ЧастицНаМ3 ) ) &lt; 10 ),         )</code>
4.	Снегопад. Средний	<code>allof(         ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ),         ( 10 &lt; around( count( ЧастицНаМ3 ) ) &lt; 100 ),         )</code>
5.	Снегопад. Сильный	<code>allof(         ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ),         ( around( count( ЧастицНаМ3 ) ) &gt; 100 ),         )</code>
6.	Снегопад	<code>anyof(         Снегопад.Слабый, Снегопад.Средний, Снегопад.Сильный,         )</code>
7.	Мокрый снег	<code>allof(         Снегопад,         ( aggregate( celsius( ТемператураВоздуха ), meters( 100 ) and Высота &lt; meters( 5 ), seconds( 60 ), avg ) &gt; 0 ),         ( aggregate( celsius( ТемператураВоздуха ), meters( 100 ) and Высота &gt; meters( 30 ), seconds( 60 ), max ) &lt; 0 ),         ( exact( celsius( ТемператураПоверхности ) ) &lt; celsius( 0 ) ),         )</code>
8.	Гололед (обледенение)	<code>allof(         ( exact( celsius( ТемператураПоверхности ) ) &lt; celsius( 0 ) ),         anyof(             allof(                 ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ),                 ( around( celsius( ЖидкоеСостояниеЧастиц ) ) &gt; fraction( 0.75 ) ), #                 переохлажденная жидкость             ),             ( celsius( 0 ) &lt; around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 5 ) ),         ),         )</code>

<sup>12</sup> Все о зимних осадках // Примгидромет: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://old.primgidromet.ru/news/vse\\_o\\_zimnih\\_osadkach](http://old.primgidromet.ru/news/vse_o_zimnih_osadkach) (дата обращения: 06.10.2024).

<sup>13</sup> Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 3. Ч. 1. 297 с.

## 4 Выводы

Введение концепции пространственных и пространственно-временных явлений позволяет абстрагироваться от деталей отдельных предметных областей в пользу обеспечения простоты и удобства анализа в пространственном или пространственно-временном домене. Благодаря такой абстракции становится возможным разрабатывать общие методы анализа и применять их к явлениям и процессам, определенным в рамках предложенного аппарата. Более того, упрощается интеграция данных о пространственных явлениях, изучаемых различными областями науки.

Практическая значимость исследования состоит в приближении понятийного аппарата, в котором выражены результаты пространственного анализа, к потребностям практики. Кроме того, можно выдвинуть гипотезу о том, что применение современных методов машинного обучения, в том числе моделей на основе искусственных нейронных сетей, для предсказания агрегированных данных о пространственных явлениях вместо отдельных величин, необходимых для их определения, может обеспечить лучшие показатели качества и производительности при сравнимой или большей практической пользе. Дальнейшие работы авторов будут посвящены проверке этой гипотезы.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Dovey K., Woodcock I., Pike L. Isochrone mapping of urban transport: car-dependency, mode-choice and design research // *Planning Practice & Research*. 2017. Vol. 32. No. 4. P. 402–416. DOI:10.1080/02697459.2017.1329487.
2. Reis J.P., Silva E.A., Pinho P. Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities // *Urban Geography*. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 246–271. DOI:10.1080/02723638.2015.1096118.
3. DeRubertis D. Recent Trends in Four Common Stability Indices Derived from U.S. Radiosonde Observations // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19. No. 3. P. 309–323. DOI:10.1175/JCLI3626.1.
4. Котьяк П.А., Чебыкина Е.В., Воронин А.Н. и др. Изменение токсичности почвы под действием технологий возделывания культур // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. № 8(226). С. 25–33. DOI:10.53083/1996-4277-2023-226-8-25-33.
5. Kowalska J.B., Mazurek R., Gąsiorek M., et al. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420. DOI:10.1007/s10653-018-0106-z.
6. Zhang H., Casey T. Verification of Categorical Probability Forecasts // *Weather and Forecasting*. 2000. Vol. 15. No. 1. P. 80–89. DOI:10.1175/1520-0434(2000)015<0080:VOCPF>2.0.CO;2.
7. Koyuncu M. Intelligent fuzzy queries for multimedia databases // *International Journal of Intelligent Systems*. 2011. Vol. 26. No. 10. P. 930–951. DOI:10.1002/int.20507.
8. Moreira J., Duarte J., Dias P. Modeling and representing real-world spatio-temporal data in databases // *Proceedings of the 14th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2019)*, September 9–13, 2019, Regensburg. Saarbrücken/Wadern: Dagstuhl Publishing, 2019. P. 1–14. DOI:10.4230/LIPICs.COSIT.2019.6.
9. Zhao X., Zhang J., Cao Y., et al. Spatio-temporal knowledge embedding method considering the lifecycle of geographical entities // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 131. P. 13. DOI:10.1016/j.jag.2024.103967.
10. Howson C. *The logic of bayesian probability* // *Foundations of Bayesianism* / ed. by D. Corfield, J. Williamson. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2001. P. 137–159.
11. Пичугин М.К., Гурвич И.А., Баранюк А.В. и др. Разработка диагностического алгоритма идентификации замерзающих осадков на Дальнем Востоке на основе данных реанализа ERA5 и измерений со спутника GPM //

Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 282.  
DOI:10.21046/22DZZconf-2024a.

**АВТОРЫ** **Бельшева Юлия Владимировна**

✉ meteoinfo@list.ru

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

кафедра информационно-измерительных систем,  
факультет геоинформатики и информационной безопасности

🆔 0009-0002-5785-3904

**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

**Матерухин Андрей Викторович**

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

кафедра информационно-измерительных систем,  
факультет геоинформатики и информационной безопасности

д-р техн. наук

🆔 0000-0002-9576-9925

Поступила 13.01.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# The concept of spatio-temporal phenomena

**Yulia V. Belysheva<sup>1</sup>, Oleg G. Gvozdev<sup>1</sup>✉, Andrey V. Materukhin<sup>1</sup>**

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

**CITATION** Belysheva YuV, Gvozdev OG, Materukhin AV. The concept of spatio-temporal phenomena. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 70–82. DOI:10.30533/GiA-2025-023.

**KEYWORDS** spatio-temporal data, data processing, complex phenomena, space-time

**ABSTRACT** In many practical problems, solved via spatio-temporal properties of studied phenomena, precisely measured values of basic indicators, facts or spatial relations are not as significant as integral characteristics, that are often can't be strictly defined. In subject areas for which such problems are typical, has developed practice of their integral representation as binary, point, categorical and continuous scales. In this paper, a formal apparatus of spatio-temporal phenomena is proposed. It allows to take into account aspects related to the limited applicability of base subject area concepts, aspects of spatiotemporal uncertainty of studied phenomena, and fundamentally non-strict definition of practically significant concepts. A human-machine-readable notation based on the grammar of the Python 3 is proposed. It allows to define spatio-temporal phenomena and, potentially, capable of serving as a base for their identification and localization automation. Several examples of its application for definition of meteorological phenomena is given. The proposed constructions allow to unify of data processing of the localization of complex phenomena in space and time, including circumstances different subject areas interaction.

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

- REFERENCES**
1. Dovey K, Woodcock I, Pike L. Isochrone Mapping of Urban Transport: Car-dependency, Mode-choice and Design Research. *Planning Practice & Research*. 2017;32(4): 402–416. DOI:10.1080/02697459.2017.1329487.
  2. Reis JP, Silva EA, Pinho P. Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities. *Urban Geography*. 2016;37(2): 246–271. DOI:10.1080/02723638.2015.1096118.

3. DeRubertis D. Recent Trends in Four Common Stability Indices Derived from U.S. Radiosonde Observations. *Journal of Climate*. 2006;19(3): 309–323. DOI:10.1175/JCLI3626.1.
4. Kotjak PA, Chebykina EV, Voronin AN, et al. Izmenenie toksichnosti pochvy pod dejstviem tehnologij vozdeleyvaniya kultur [Changes in soil toxicity under the influence of cultivation technologies]. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023;8(226): 25–33. (In Russian). DOI:10.53083/1996-4277-2023-226-8-25-33.
5. Kowalska JB, Mazurek R, Gašiorek M, et al. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40: 2395–2420. DOI:10.1007/s10653-018-0106-z.
6. Zhang H, Casey T. Verification of Categorical Probability Forecasts. *Weather and Forecasting*. 2000;15(1): 80–89. DOI:10.1175/1520-0434(2000)015<0080:VOCPF>2.0.CO;2.
7. Koyuncu M. Intelligent fuzzy queries for multimedia databases. *International Journal of Intelligent Systems*. 2011;26(10): 930–951. DOI:10.1002/int.20507.
8. Moreira J, Duarte J, Dias P. Modeling and Representing Real-World Spatio-Temporal Data in Databases. *Proceedings of the 14th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2019), September 9–13, 2019, Regensburg*. Saarbrücken/Wadern: Dagstuhl Publishing, 2019. P. 1–14. DOI:10.4230/LIPICs.COSIT.2019.6.
9. Zhao X, Zhang J, Cao Y, et al. Spatio-temporal knowledge embedding method considering the lifecycle of geographical entities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024;131: 13. DOI:10.1016/j.jag.2024.103967.
10. Howson C. The logic of bayesian probability. *Foundations of Bayesianism*. Corfield D, Williamson J (ed.). Dordrecht: Springer Science + Business Media; 2001: 137–159.
11. Pichugin MK, Gurvich IA, Baranjuk AV, et al. Razrabotka diagnosticheskogo algoritma identifikatsii zamerzajuschih osadkov na Dalnem Vostoke na osnove dannyh reanaliza ERA5 i izmerenij so sputnika GPM [Development of a diagnostic algorithm for identification of freezing precipitation in the Far East based on ERA5 reanalysis data and GPM satellite measurements]. *Proceedings of the 23rd International Conference “Modern problems of remote sensing of the Earth from space”*. Moscow: IKI RAS, 2024: 268. DOI:10.21046/22DZZconf-2024a.

**AUTHORS Yulia V. Belysheva**

✉ meteoinfo@list.ru

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Information and Measurement Systems, Faculty of Geoinformatics  
 and Information Security

 0009-0002-5785-3904
**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
**Andrey V. Materukhin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Information and Measurement Systems, Faculty of Geoinformatics  
 and Information Security  
 Dr. of Sci. (Engineering)

 0000-0002-9576-9925

Submitted: January 13, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



# Особенности применения нейронных сетей при распознавании антропогенных объектов с вариативными контурами

А.Г. Саидов<sup>1</sup>, Д.В. Жуков<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия  
✉ spb\_pilligrim83@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Саидов А.Г., Жуков Д.В. Особенности применения нейронных сетей при распознавании антропогенных объектов с вариативными контурами // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 83–95. DOI:10.30533/GiA-2025-030.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** семантическая сегментация, сегментация экземпляров, аэрокосмические изображения, глубокое обучение, метрики, датасет

**АННОТАЦИЯ** В работе анализируется результативность методов семантической сегментации и сегментации экземпляров при решении задачи идентификации антропогенных объектов с разной степенью вариативности контуров (границ) на аэрокосмических изображениях. Используются такие нейросетевые модели, как U-Net, PSPNet, DeepLabv3+, SegFormer, Twins-PCPVT, ConvNeXt, YOLOv7, YOLOv8, YOLOv9 и YOLOv11. Авторы выделяют три уровня вариативности контуров объектов и анализируют ее влияние на точность и обобщаемость моделей. Важным аспектом работы является анализ связи между вариативностью контура объекта и эффективностью используемых методов глубокого обучения. Исследование включает в себя аннотирование данных космической съемки для определения степени вариативности границ объектов, проведение экспериментов с нейронными сетями и разработку алгоритма сравнения результативности сетей, относящихся к разным типам сегментации. Обсуждаются метрики оценки качества сегментации и особенности их интерпретации. Результаты показывают, что нейросетевые модели семантической сегментации более эффективны при обнаружении объектов большой площади, границы которых имеют выраженную вариативность, в то время как модели сегментации экземпляров позволяют получить высокие показатели качества распознавания при работе с объектами, имеющими минимальную вариативность границ. Подчеркивается важность учета вариативности контуров объектов при подготовке данных и выборе методов сегментации, а также необходимость дальнейших исследований для улучшения обучения моделей и повышения вероятности выявления объектов.

# 1 Введение

Высокие темпы современного развития космических систем дистанционного зондирования Земли обуславливают обращение для интерпретации данных, получаемых от этих систем, к методам машинного обучения, в том числе основанным на нейросетевых технологиях. Одним из основных факторов, который сдерживает успешное использование такого инструментария в программных продуктах тематической обработки космических изображений (КИ), является сложность прогнозирования качества обучения нейронных сетей (НС). Как правило, такой прогноз осуществляется на основе ранее полученных экспериментальных данных. При этом на первом этапе разработки модели НС важным является вопрос о выборе наиболее подходящего типа и архитектуры НС. Сложности, возникающие при решении данного вопроса экспериментальным путем, связаны с интерпретацией получаемых результатов, поскольку метрики оценки качества обучения у разных типов НС также различаются. Таким образом, исследования данной проблемы имеют важное практическое и научное значение. На практике анализ результатов применения различных НС в интересах распознавания антропогенных объектов на КИ (одна из основных задач тематической обработки) позволяет в дальнейшем делать более обоснованный выбор типа и архитектуры НС. Научная составляющая связана с разработкой новой технологии сравнения результативности НС различных типов.

Задача распознавания и определения границы объекта интереса на КИ традиционно решается с помощью НС двух типов:

- 1) семантической сегментации (*англ.* semantic segmentation) — назначение каждому пикселю изображения определенного класса [1];
- 2) сегментации экземпляров (*англ.* instance segmentation) — определение границы каждого предварительно распознанного объекта (при этом объекты представляют собой отдельные экземпляры, даже если относятся к одному классу) [2].

Оба типа НС широко используются в различных сферах жизни общества: медицине, автономном вождении, робототехнике и т. д. Однако до сих пор отсутствуют исследования, посвященные сравнительному анализу НС применительно к дешифрированию КИ. При этом выбор типа НС зависит в том числе и от характеристик объектов интереса. Одной из них является вариативность границ, под которой следует понимать не изменение контура объекта с течением времени, а его четкость и однозначность определения на КИ. Влияние этого параметра на результативность различных НС ранее не изучалось.

В данной работе была поставлена задача провести анализ качества обучения НС разных типов и архитектур при распознавании антропогенных объектов с учетом степени вариативности их границ. При этом не ставилась цель получения максимальных значений показателей качества обучения НС. Усилия были сосредоточены на том, чтобы понять, какие из множества доступных на сегодняшний день НС со стандартными значениями гиперпараметров будут наиболее результативно распознавать конкретный класс антропогенных объектов.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Набор данных для обучения нейронных сетей

Для решения поставленной задачи был сформирован набор обучающих данных, включающий в себя материалы трехканальной цветной цифровой космической съемки сверхвысокого и высокого разрешения (от 0,4 до 2,2 м), предоставляемые различными открытыми геосервисами, такими как «Яндекс Карты», ESRI World Imagery, Bing Maps и т. д. Всего было аннотировано 2076 КИ размером 12 802 пикселей.

В качестве объектов интереса было выбрано 6 классов: градири, резервуары, распределительные устройства (РУ), блочные насосные станции (БНС), парковочные зоны (ПЗ) и регулированные сбросы вод (РСВ). В табл. 1 приведены основные характеристики обучающего набора данных.

Класс	Кол-во меток	Частота появления на сто снимков	Общая площадь меток, %	Средняя площадь объектов, пиксели	Среднеквадратичное отклонение площадей объектов, пиксели	Совпадение с повторной разметкой, %	Степень вариативности
Градири	603	15,4	2,8	255,7	73,0	94,6	Минимальная
Резервуары	13 024	70,8	59,8	28,3	11,8	80,8	Минимальная
РУ	1924	64,5	8,8	382,1	249,2	83,4	Средняя
БНС	1217	40,7	5,6	136,3	65,8	73,3	Средняя
ПЗ	4216	60,8	19,3	189,1	121,7	76,5	Средняя
РСВ	815	22,7	3,7	137,2	121,3	48,1	Выраженная

**Таблица 1** ⬆  
Характеристики обучающего набора данных

**Table 1**  
Characteristics of the training dataset

## 2.2 Метод определения степени вариативности границ объектов интереса

Для определения количества градаций степени вариативности границ объектов различных классов был проведен эксперимент, аналогичный тому, который описан в работе [3]. Суть эксперимента заключалась в том, что один и тот же человек дважды, с интервалом в несколько месяцев, осуществлял разметку одного и того же набора изображений, после чего два варианта разметки сравнивались между собой. Анализ полученных в указанной работе результатов позволяет сделать вывод, что во многом величина ошибки (степень несовпадения контуров при первичной и повторной разметке) зависит от среднего размера объектов в классе и от вариативности их границ.

В эксперименте, проведенном авторами статьи, было переразмечено 207 изображений, которые содержали примерно по 10 % от изначального количества объектов каждого класса в сформированном наборе данных, представленном в табл. 1. Итоговые значения совпадения площадей для классов указаны в столбце «Совпадение с повторной разметкой». Примеры первичной и повторной разметки приведены на рис. 1.

**Рис. 1** ⬆  
Сравнение оригинальной и повторной разметок

**Fig. 1**  
Comparison of original and relabeled annotations



**Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы.**

1. Неточности определения границ для градиен незначительны и связаны с трудностями определения контура при активном состоянии объектов из-за пара.
2. При разметке БНС оператор мог включить в контур или исключить из него козловой кран при удалении последнего от основных сооружений БНС.
3. Значение 20 % в несовпадении площадей резервуаров объясняется пропусками объектов, имеющих малый размер, на КИ с низким разрешением (рис. 1).
4. При определении границ РУ использовались разные подходы. В одном случае строился один общий контур для всего объекта, в другом — выделялись несколько локализованных контуров вместо одного общего. При этом малое значение процента совпадения разметок (табл. 1) объясняется тем, что РУ имеют значительную площадь.
5. Для разметки ПЗ характерны такие типовые ошибки, как пропуск объектов и разные подходы при определении границ.
6. РСВ характеризуются самым низким показателем площади совпадения, а также самым высоким относительным среднеквадратичным отклонением; как видно из примера на рис. 1, граница таких объектов очень условна.

Совокупность таких показателей, как средняя площадь объектов, среднеквадратичное отклонение площадей объектов и процент совпадения с повторной разметкой, полученных в ходе проведенного эксперимента, позволяет условно разделить все рассматриваемые классы объектов по степени вариативности их границ на три группы. К первой группе (минимальная степень вариативности) относятся объекты, имеющие четкие границы и простые формы. Объекты второй группы (средняя степень вариативности) обладают сложными формами, а результат выделения их контуров зависит от особенностей восприятия сцены оператором. Объекты третьей группы (выраженная степень вариативности) характеризуются нечеткостью своих границ: наличием буферной зоны между объектом и фоном, в пределах которой затруднительно однозначно определить принадлежность каждого конкретного пикселя к объекту или фону.

### 2.3 Используемые архитектуры нейронных сетей и их настройка

В данной работе исследовались наиболее значимые и популярные НС, обеспечивающие сегментацию изображения. В качестве моделей семантической сегментации использовались: U-Net backbone UNet-S5-D16 (2015.05) [4], PSPNet backbone R-101-D8 (2017.04) [5], DeepLabv3+ backbone R-101-D8 (2018.08) [6], SegFormer backbone MIT-B4 (2021.05) [7], Twins-PCPVT (2021.09) [8], ConvNeXt (2022.03) [9]. НС сегментации экземпляров были представлены следующими моделями: YOLOv7 (2022.07) [10], YOLOv8 (2023.01)<sup>1</sup>, YOLOv9 (2024.02) [11], YOLOv11 (2024.09) [11].

Интерес к исследованию свойств новых версий сетей YOLO библиотеки Ultralytics возникает в том числе потому, что традиционно компания Ultralytics не выпускает сопровождающих статей при их релизе, но научное сообщество с энтузиазмом делает это за нее<sup>2</sup> [12–13].

Включение в список сравнительно старых НС PSPNet и U-Net позволит оценить, насколько далеко продвинулись новые сетевые модели и насколько результативен базовый подход семантической сегментации.

1 Jocher G., Qiu J., Chaurasia A. Ultralytics YOLO. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 02.04.2025).

2 Ghosh A. YOLO11: Faster than you can imagine! [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://learnopencv.com/yolo11> (дата обращения: 15.10.2024).

Многочисленные исследования аугментации [14–16] свидетельствуют о том, что применение этой процедуры повышает качество обучения НС. Однако в данной работе настройка аугментации производилась таким образом, чтобы она обеспечивала равные условия обучения для всех исследуемых моделей НС. Поэтому для дополнения обучающего набора данных применялась только яркостная (изменение яркости, контраста, насыщенности, оттенка) и геометрическая (изменение размера, кадрирование, отражение по вертикали и горизонтали) коррекция изображений и не использовались настройки, доступные только в сетях YOLO, такие, например, как поворот изображения и объединение изображений (создание мозаики).

Размер пакета нормализации (*англ.* batch size) для всех методов был принят равным 4. В исследовании [3] сообщается, что этот показатель имеет решающее значение при обучении НС, однако технические ограничения не позволили исследовать данный вопрос.

При обучении НС семантической сегментации были использованы базовые настройки планировщика schedule\_160k.py. Однако число итераций было увеличено с 160 000 до 240 000. Это связано с тем, что при стандартном числе итераций некоторые НС оказались недообученными. Увеличение количества итераций обеспечило выход на плато всех анализируемых архитектур НС (на рис. 2 представлен пример графика изменения точности модели в процессе обучения). При этом в качестве оптимизатора для сетей DeepLabv3+, PSPNet, U-Net был использован алгоритм SGD, для сетей SegFormer, Twins и ConvNeXt — AdamW.

Для НС сегментации экземпляров количество эпох было установлено равным 240.

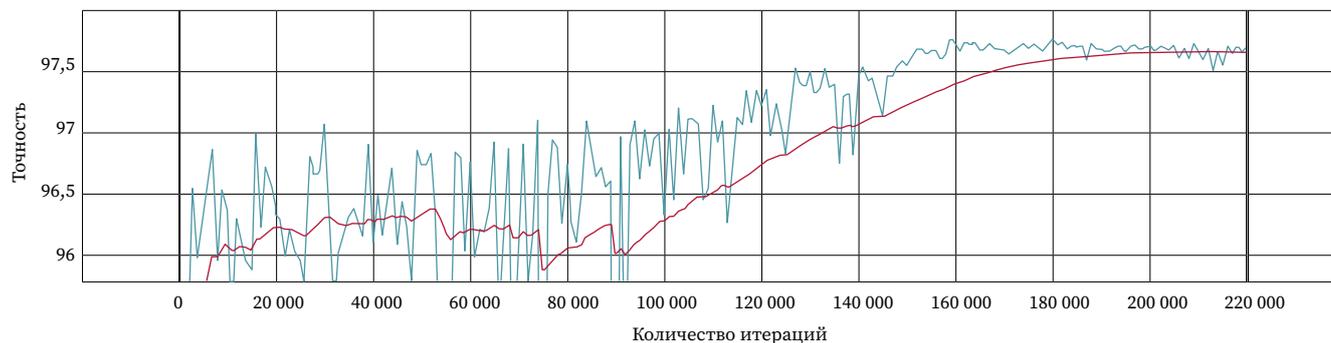
Валидация моделей производилась на тестовой выборке, которую составили 200 изображений.

**Рис. 2** 

График изменения точности модели в процессе обучения для НС PSPNet

**Fig. 2**

Training accuracy curve example for PSPNet



## 2.4 Метод сравнения качества обучения нейронных сетей различных типов

Стандартными показателями качества обучения для НС сегментации экземпляров являются метрики mAP50 и mAP50-95, для НС семантической сегментации — метрики accuracy и IoU. Однако сравнение результативности распознавания объектов сетями разных типов по соответствующим метрикам невозможно, т. к. эти метрики имеют принципиально разные алгоритмы расчета. Расчет mAP50 и mAP50-95 основывается на количестве правильно и ошибочно распознанных объектов, а также степени уверенности сети в отнесении объекта к данному классу (*англ.* confidence). НС семантической сегментации не разделяет результаты распознавания на отдельные объекты и не вычисляет параметр confidence, в результате получается другой набор выходных данных, не позволяющий рассчитать метрику AP. Вместе с тем поиск метрик, наиболее релевантно оценивающих качество обучения НС разных типов, продолжается до сих пор. Пока этот процесс нельзя назвать завершенным: предлагаются различные подходы расчета показателей результативности распознавания как для семантической

сегментации<sup>3</sup>, так и для сегментации экземпляров [17]. Это обстоятельство позволяет предложить свой уникальный способ оценки качества обучения НС разных типов, который обеспечивал бы их сравнение.

Для сравнения НС разных типов между собой наиболее подходящей является метрика IoU, которая может быть рассчитана как при сегментации экземпляров, так и при семантической сегментации и позволяет оценить степень совпадения между предсказанными и эталонными границами. Однако алгоритмы расчета этой метрики у сетей разных типов различаются.

В задаче сегментации экземпляров метрика IoU представляет собой степень перекрытия эталонного и предсказанного контуров для каждого объекта в отдельности и может сильно изменяться у одной и той же обученной модели в зависимости от установленного порога confidence и значения подавления немаксимумов (*англ.* non-maximum suppression) — параметра, который отвечает за частоту построения перекрывающихся контуров распознаваемых объектов. При этом могут пересекаться границы объектов, принадлежащих не только к разным классам, но и к одному классу.

В НС семантической сегментации такие настройки, как confidence и non-maximum suppression, не имеют значения. Кроме того, отсутствует эффект перекрытия контуров от разных объектов.

Таким образом, при сравнении результативности НС разных типов по метрике IoU возникают две проблемы:

- в результатах распознавания с помощью НС сегментации экземпляров необходимо учесть эффект пересечения контуров объектов интереса, который отсутствует у сетей семантической сегментации;
- при обработке материалов съемки с помощью НС сегментации экземпляров необходимо обосновать выбор параметров confidence и non-maximum suppression, которые отсутствуют у НС семантической сегментации.

Для решения первой проблемы перед расчетом метрики IoU для НС сегментации экземпляров результаты распознавания модифицируются следующим образом:

1. Все экземпляры объектов объединяются по классам.
2. При перекрытии контуров объектов, относящихся к одному классу, выполняется слияние этих контуров.
3. В случае перекрытия контуров объектов разных классов зона перекрытия рассматривается как особый сегмент. Принадлежность пикселей в этом особом сегменте к соответствующим классам считается равновероятной. Таким образом, при определении суммарных площадей истинно положительных (TP), ложноположительных (FP), ложноотрицательных (FN) сегментов площадь особого сегмента умножается на соответствующую вероятность, что учитывается в дальнейшем при расчете метрики IoU.

Последний случай в сформированном для эксперимента наборе данных не встречался, поэтому не представляется возможным определить, как учет такого эффекта влияет на конечные значения IoU.

Метрика IoU, таким образом, может быть рассчитана аналогично моделям семантической сегментации. При таком подходе теряется ключевая идея работы алгоритма сегментации экземпляров — разделение результатов предсказания на отдельные объекты внутри класса, но в то же время это позволяет в численном эквиваленте сравнить результативность НС различных типов.

Для решения второй проблемы были проведены исследования изменения метрики IoU, рассчитанной по модифицированным результатам распознавания в зависимости от параметров confidence и non-maximum suppression. Значения, полученные для НС YOLOv11, приведены в табл. 2. Закономерность изменения IoU для других НС семейства YOLO имеет схожий характер.

Анализ приведенных в табл. 2 данных позволяет определить оптимальные значения confidence и non-maximum suppression равными 0,1 и 0,5 соответственно.

<sup>3</sup> Monteux A. Metrics for semantic segmentation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ilmonteux.github.io/2019/05/10/segmentation-metrics.html> (дата обращения: 14.11.2024).

**Таблица 2** ↗

Изменение значений IoU в зависимости от параметров confidence и non-maximum suppression для модели YOLOv11

**Table 2**

Changes in IoU values depending on confidence and non-maximum suppression parameters for the YOLOv11 model

		Параметр non-maximum suppression									
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Параметр confidence	0,05	59,5	62,3	62,6	62,8	62,8	63,0	62,9	62,9	62,9	63,0
	0,1	59,9	62,7	62,9	63,2	63,4	63,5	63,4	63,5	63,5	63,6
	0,2	59,1	62,0	62,1	62,3	62,5	62,7	62,6	62,7	62,7	62,8
	0,3	58,1	61,0	61,2	61,3	61,5	61,7	61,7	61,6	61,7	61,7
	0,4	56,7	59,5	59,7	59,9	59,9	60,1	60,2	60,2	60,2	60,2
	0,5	54,7	57,6	57,8	57,9	58,0	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1
	0,6	52,4	55,2	55,4	55,5	55,6	55,7	55,7	55,7	55,7	55,7
	0,7	48,3	50,9	51,1	51,2	51,2	51,3	51,3	51,3	51,3	51,3
	0,8	41,2	43,2	43,2	43,3	43,3	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4
	0,9	15,7	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2

Объясняется это следующим образом. Для confidence в интервале от 0,1 до 0,9 с ростом значений этого параметра наблюдается снижение IoU. Такой эффект связан с увеличением числа ложноотрицательных сегментов. В то же время уменьшение confidence от 0,1 до 0,05 также приводит к снижению IoU, однако в данном случае это происходит за счет роста ложноположительных объектов. Таким образом, максимум IoU регистрируется при confidence, равном 0,1.

При выборе значения параметра non-maximum suppression очевидно, что приравнивание его к 0 (отсутствие пересекающихся контуров) приведет к ощутимой потере качества распознавания, поскольку при пересечении границ объектов алгоритм выбирает только самый значимый контур, остальные, с которыми происходит пересечение, удаляются из результатов распознавания. Стабилизация результатов происходит при значениях больше 0,4.

### 3 Результаты и обсуждение

#### 3.1 Результаты обучения нейронных сетей

Стандартные показатели качества обучения НС, рассчитанные по тестовому набору данных, приведены в табл. 3 (для сетей сегментации экземпляров), табл. 4 (для сетей семантической сегментации). При этом метрики, представленные в табл. 3, рассчитывались для сегментов (не для ограничивающих рамок типа box) распознанных объектов.

Примеры результатов предсказаний на тестовых изображениях обученных моделей НС приведены на рис. 3.

**Таблица 3** ↘

Показатели качества для обученных моделей сегментации экземпляров

**Table 3**

Metrics for trained instance segmentation models

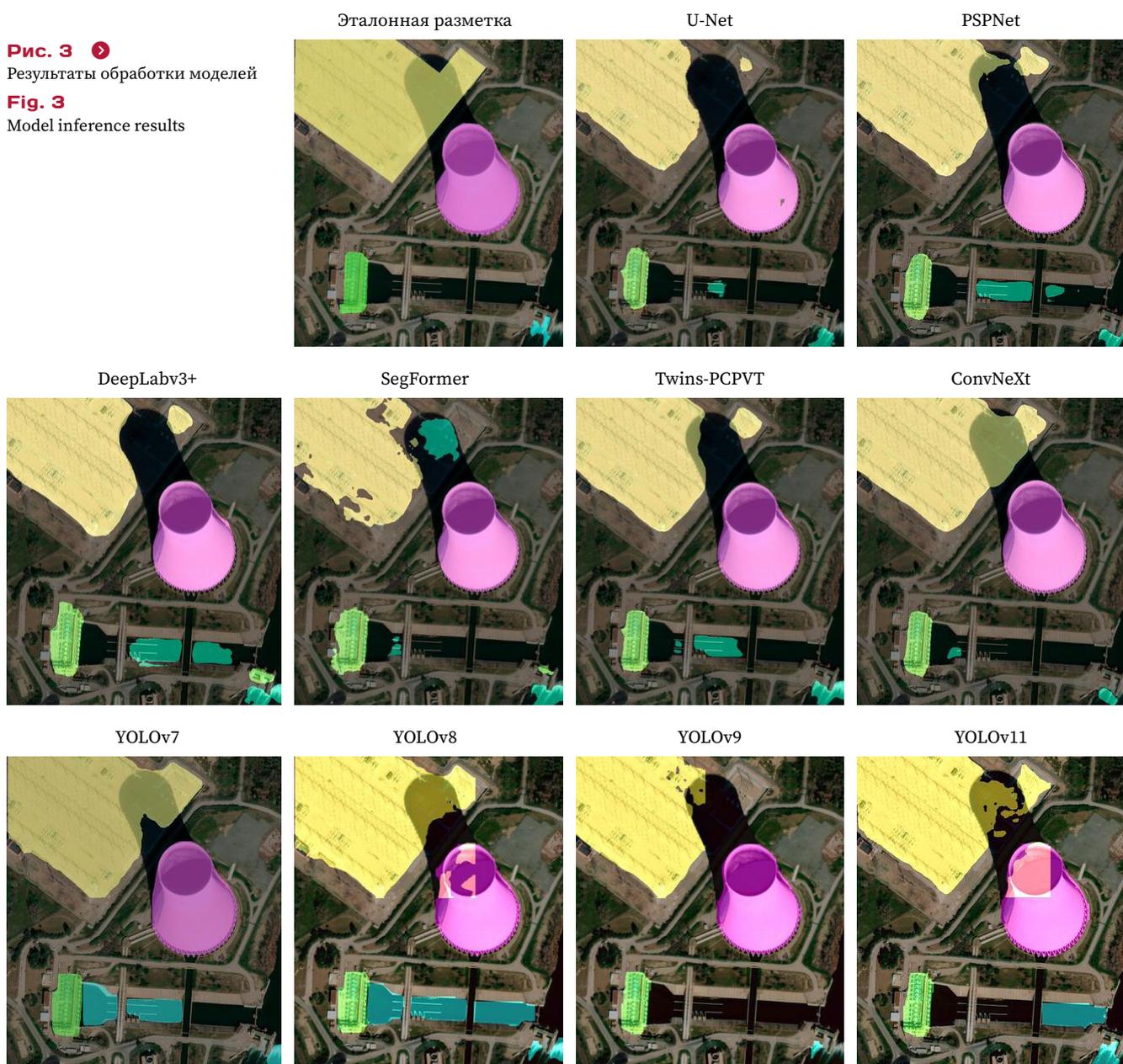
Модель	Градирни		Резервуары		РУ		БНС		ПЗ		РСВ		Среднее по всем классам	
	mAP50	mAP50-95	mAP50	mAP50-95	mAP50	mAP50-95	mAP50	mAP50-95	mAP50	mAP50-95	mAP50	mAP50-95	mAP50	mAP50-95
YOLOv7	1,00	0,84	0,90	0,60	0,67	0,41	0,65	0,33	0,49	0,29	0,32	0,10	0,67	0,43
YOLOv8	0,99	0,84	0,91	0,59	0,77	0,47	0,83	0,47	0,60	0,36	0,38	0,12	0,75	0,48
YOLOv9	1,00	0,84	0,90	0,55	0,79	0,47	0,84	0,46	0,58	0,36	0,27	0,10	0,73	0,46
YOLOv11	1,00	0,85	0,90	0,52	0,82	0,48	0,82	0,43	0,56	0,33	0,20	0,07	0,71	0,45

**Таблица 4**   
Показатель точности для обученных моделей семантической сегментации

**Table 4**  
Accuracy scores for trained semantic segmentation models

Модель	Градирни	Резервуары	РУ	БНС	ПЗ	PCB	Среднее по всем классам
U-Net	67,3	75,1	80,2	23,2	66,6	19,0	61,5
PSPNet	90,6	74,9	88,9	38,8	65,3	23,9	68,8
DeepLabv3+	90,0	71,8	88,9	54,3	66,3	35,2	72,2
SegFormer	92,0	56,1	85,3	29,7	62,9	25,1	64,3
Twins-PCPVT	94,0	80,4	88,3	52,0	70,5	47,0	75,8
ConvNeXt	93,1	77,9	92,5	57,0	80,5	48,1	78,3

**Рис. 3**   
Результаты обработки моделей  
**Fig. 3**  
Model inference results



### Анализ значений показателей качества обучения НС и визуальный анализ результатов распознавания позволили сделать следующие выводы:

1. Отмечается корреляция между показателями качества обучения НС и степенью вариативности границ распознаваемых объектов: объекты РСВ имеют самые низкие показатели для обоих типов НС. Градирни, напротив, несмотря на меньшее по сравнению с РСВ количество меток, распознаются более уверенно.
2. На показатели качества обучения НС также влияют геометрические размеры распознаваемых объектов, что подтверждается работой [3].
3. На примере сегментации РУ (рис. 3) видно, что с задачей распознавания объекта, если он находится в тени, наиболее корректно справляются НС сегментации экземпляров. Из сетей семантической сегментации удовлетворительные результаты показала только НС ConvNeXt, несмотря на то что архитектура НС Twins относится к более современным сетям-трансформерам.

## 3.2 Результаты сравнения нейронных сетей разных типов

**Таблица 5** 

Показатели качества обучения для апробированных моделей по метрике IoU

**Table 5**

Training quality metrics for evaluated models (IoU metric)

С учетом обоснованного выбора значений параметров confidence и non-maximum suppression и преобразования результатов распознавания для НС сегментации экземпляров была получена возможность сравнить по метрике IoU результативность НС различных типов при распознавании антропогенных объектов. Полученные значения метрики представлены в табл. 5.

Модель	Градирни	Резервуары	РУ	БНС	ПЗ	РСВ	Среднее по всем классам
U-Net	60,1	67,4	74,9	22,5	61,2	17,6	50,6
PSPNet	69,9	69,3	82,2	36,6	61,5	23,3	57,1
DeepLabv3+	87,1	67,2	81,4	48,1	60,4	29,4	62,3
SegFormer	78,0	50,3	77,9	26,6	57,8	20,7	51,9
Twins-PCPVT	72,3	<b>73,5</b>	80,7	44,6	64,4	40,1	62,6
ConvNeXt	87,6	69,4	<b>84,4</b>	52,5	<b>71,7</b>	<b>40,9</b>	<b>67,8</b>
YOLOv7	<b>90,8</b>	68,6	62,4	43,8	54,2	23,6	57,2
YOLOv8	88,7	66,0	70,2	58,5	63,2	37,3	64,0
YOLOv9	89,4	65,6	70,0	56,4	62,3	27,5	61,9
YOLOv11	89,2	65,6	72,3	<b>60,1</b>	62,3	30,8	63,4

### Анализ приведенных в табл. 5 данных позволил сделать следующие выводы.

1. При распознавании антропогенных объектов в целом наиболее результативной является НС ConvNeXt. Она имеет наиболее высокий усредненный показатель IoU среди всех моделей. Кроме того, эта сеть показывает максимальные значения IoU по сравнению с другими исследуемыми моделями семантической сегментации практически для всех классов объектов, за исключением резервуаров. Однако и в этом случае применительно к рассматриваемой задаче разница между максимальным значением 73,5, характерным для НС Twins-PCPVT, и значением 69,4 у НС ConvNeXt не принципиальна.
2. Антропогенные объекты, характеризующиеся средней и выраженной степенью вариативности границ (за исключением БНС), наиболее достоверно распознаются с помощью НС семантической сегментации. Это подтверждается как максимальными значениями IoU, так и сравнением средних значений этого показателя, рассчитанных по всем НС, принадлежащих одному типу, для каждого класса объектов. Сложность распознавания БНС сетями семантической сегментации может быть связана

с нехваткой обучающих данных: объекты этого класса характеризуются высокой вариативностью своих конструкций, при этом по количеству меток они находятся на третьем месте в наборе обучающих данных, ниже расположены только РСВ, имеющие на снимках устойчивые яркие и текстурные характеристики, и градири — сравнительно большие объекты, имеющие устойчивые геометрические формы и размеры.

3. Крупные объекты с минимальной вариативностью (градири) лучше распознаются с помощью моделей семейства YOLO. Для всех НС этого типа значение показателя IoU не опускается ниже 88, а максимальный результат, равный почти 91, показывает сеть YOLOv7. При этом результаты НС семантической сегментации (как и разница между их выпуском) варьируются в достаточно широких пределах: от 60 до 87.
4. Резервуары, являющиеся небольшими объектами с минимальной степенью вариативности границ, в целом с соразмеряемой достоверностью распознаются как НС семантической сегментации, так и НС сегментации экземпляров. Чуть более низкие показатели IoU у последних объясняются перекрытием областей расположения у близко размещенных по отношению друг к другу объектов.
5. Низкие показатели IoU при распознавании РСВ имеют несколько причин: самое высокое отношение среднеквадратичного отклонения / средней площади, низкая частота появления на снимках и выраженная вариативность контуров (т. е. самое малое значение совпадения контуров при повторной разметке).

## 4 Выводы

По результатам исследований можно сделать следующий вывод: степень вариативности границ объектов, наряду с другими характеристиками класса, является важным, но не до конца проработанным и изученным показателем. Учет этого параметра может помочь при решении различных задач компьютерного зрения уже на этапе подготовки данных. Так, для объектов с минимальной степенью вариативности границ достаточно сравнительно небольшого количества примеров в обучающем наборе данных для достижения высоких показателей результативности распознавания. Основное внимание при этом следует сосредотачивать на объектах с выраженной степенью вариативности границ.

До сих пор не было проведено исследований по сравнению методов сегментации экземпляров и семантической сегментации. С рядом оговоренных условий представленные в статье материалы позволяют решить эту задачу.

Вместе с тем в дальнейшем необходимо исследовать применимость моделей НС к более широкому классу объектов с учетом степени вариативности их границ. Следует также оценить влияние гиперпараметров на улучшение обучения моделей. Кроме того, большой интерес представляет анализ методов паноптической сегментации, которые на данном этапе авторами не рассматривались.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают особую благодарность Роману Хабарову за вдохновение и идеи, без которых бы не было данного исследования.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston: IEEE, 2015. P. 3431–3440. DOI:10.1109/CVPR.2015.7298965.
2. He K., Gkioxari G., Dollar P., et al. Mask R-CNN // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Venice: IEEE, 2017. P. 2980–2988. DOI:10.1109/ICCV.2017.322.
3. Zhao H., Puig X., Xiao T., et al. Semantic Understanding of Scenes through the ADE20K Dataset // Preprint arXiv.org, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1608.05442> (дата обращения: 11.07.2024).

4. Ronneberger O., Fischer Ph., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Preprint arXiv.org, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597> (дата обращения: 11.07.2024).
5. Zhao H., Shi J., Qi X., et al. Pyramid scene parsing network // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017. P. 6230–6239. DOI:10.1109/CVPR.2017.660.
6. Chen L.C., Zhu Y., Papandreou G., et al. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation // Proceedings of 15th European Conference “Computer Vision – ECCV 2018”, Munich, September 8–14, 2018. Cham: Springer, 2018. P. 833–851. DOI:10.1007/978-3-030-01234-2\_49.
7. Xie E., Wenhai W., Zhiding Y. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers // Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: Red Hook, 2021. P. 12077–12090.
8. Chu X., Tian Z., Wang Y., et al. Twins: Revisiting the Design of Spatial Attention in Vision Transformers // Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: Red Hook, 2021. P. 9355–9367.
9. Liu Z., Mao H., Wu C.-Y., et al. A ConvNet for the 2020s // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans: IEEE, 2022. P. 11966–11976. DOI:10.1109/CVPR52688.2022.01167.
10. Wang C.Y., Bochkovskiy A., Liao H.Y.M. YOLOv7: Trainable Bag-of-Freebies Sets New State-of-the-Art for Real-Time Object Detectors // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver: IEEE, 2023. P. 7464–7475. DOI:10.1109/CVPR52729.2023.00721.
11. Wang Ch.-Y., Yeh I.H., Mark Liao H.-Y. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information // Proceedings of 18th European Conference “Computer Vision – ECCV 2024”, Milan, September 29 – October 4, 2024. Cham: Springer, 2024. P. 1–21. DOI:10.1007/978-3-031-72751-1\_1.
12. Sohan M., Sai Ram T., Rami Reddy Ch.V. A Review on YOLOv8 and its Advancements // Proceedings of the International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics. Singapore: Springer, 2024. P. 529–545. DOI:10.1007/978-981-99-7962-2\_39.
13. Terven J., Cordova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS // MAKE. 2023. Vol. 5. No. 4. P. 1680–1716. DOI:10.3390/make5040083.
14. Shorten C., Khoshgoftaar T.M. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // Journal of Big Data. 2019. Vol. 6. P. 60. DOI:10.1186/s40537-019-0197-0.
15. Zoph B., Cubuk E.D., Ghiasi G., et al. Learning data augmentation strategies for object detection // Preprint arXiv.org, 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1906.11172> (дата обращения: 29.04.2024).
16. Ghaffar M.A.A., McKinstry A., Maul T., et al. Data augmentation approaches for satellite image super-resolution // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. IV-2/W7. P. 47–54. DOI:10.5194/isprs-annals-IV-2-W7-47-2019.
17. Chen L., Wu Y., Stegmaier J., et al. SortedAP: Rethinking evaluation metrics for instance segmentation // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops. Paris: IEEE, 2023. P. 3925–3931. DOI:10.1109/ICCVW60793.2023.00424.

**АВТОРЫ    Саидов Алишер Голибович**

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,  
 Санкт-Петербург, Россия  
 33-й отдел, Военный институт (научно-исследовательский)

**Жуков Денис Валерьевич**

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,  
 Санкт-Петербург, Россия  
 33-й отдел, Военный институт (научно-исследовательский)  
 канд. техн. наук

Поступила 09.04.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# Features of neural network application in recognizing anthropogenic objects with variable contours

Alisher G. Saidov<sup>1</sup>, Denis V. Zhukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia  
 spb\_pilligrim83@mail.ru

**CITATION** Saidov A.G., Zhukov D.V. Features of neural network application in recognizing anthropogenic objects with variable contours. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 83–95. DOI:10.30533/GiA-2025-030.

**KEYWORDS** semantic segmentation, instance segmentation, aerospace imagery, metrics, deep learning, dataset

**ABSTRACT** The study analyzes the effectiveness of semantic segmentation and instance segmentation methods for identifying anthropogenic objects with varying degrees of boundary variability in aerospace imagery. Neural network models such as U-Net, PSPNet, DeepLabv3+, SegFormer, Twins-PCPVT, ConvNeXt, YOLOv7, YOLOv8, YOLOv9, and YOLOv11 are utilized. The authors categorize object contour variability into three levels and examine its impact on model accuracy and generalizability. A key focus of the study is the relationship between contour variability and the effectiveness of deep learning approaches. The research involves annotating remote sensing data to determine the degree of boundary variability, conducting experiments with neural networks, and developing an algorithm to compare the performance of networks belonging to different segmentation types. The paper also discusses segmentation quality metrics and their interpretation nuances. The results demonstrate that semantic segmentation models are more effective for detecting large-area objects with pronounced boundary variability, while instance segmentation models achieve high recognition accuracy for objects with minimal boundary variability. In conclusion, the authors emphasize the critical role of contour variability in data preparation and segmentation method selection. They highlight the need for further research to enhance model training and improve object detection reliability.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The authors express their special gratitude to Roman Khabarov for the inspiration and ideas that made this research possible.

**REFERENCES** 1. Long J, Shelhamer E, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Boston: IEEE; 2015: 3431–3440. DOI:10.1109/CVPR.2015.7298965.

2. He K, Gkioxari G, Dollar P, et al. Mask R-CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Venice: IEEE; 2017: 2980–2988. DOI:10.1109/ICCV.2017.322.
3. Zhao H, Puig X, Xiao T, et al. Semantic Understanding of Scenes through the ADE20K Dataset. *Preprint arXiv.org*, 2016. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1608.05442> (Accessed 11 July 2024).
4. Ronneberger O, Fischer Ph, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Preprint arXiv.org*, 2015. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597> (Accessed 11 July 2024).
5. Zhao H, Shi J, Qi X, et al. Pyramid scene parsing network. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu: IEEE; 2017: 6230–6239. DOI:10.1109/CVPR.2017.660.
6. Chen LC, Zhu Y, Papandreou G, et al. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. *Proceedings of 15th European Conference “Computer Vision – ECCV 2018”, Munich, September 8–14, 2018*. Cham: Springer; 2018: 833–851. DOI:10.1007/978-3-030-01234-2\_49.
7. Xie E, Wenhai W, Zhiding Y. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers. *Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems*. New York: Red Hook; 2021: 12077–12090.
8. Chu X, Tian Z, Wang Y, et al. Twins: Revisiting the Design of Spatial Attention in Vision Transformers. *Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems*. New York: Red Hook; 2021: 9355–9367.
9. Liu Z, Mao H, Wu CY, et al. A ConvNet for the 2020s. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New Orleans: IEEE; 2022: 11966–11976. DOI:10.1109/CVPR52688.2022.01167.
10. Wang CY, Bochkovskiy A, Liao HYM. YOLOv7: Trainable Bag-of-Freebies Sets New State-of-the-Art for Real-Time Object Detectors. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Vancouver: IEEE; 2023: 7464–7475. DOI:10.1109/CVPR52729.2023.00721.
11. Wang ChY, Yeh IH, Mark Liao HY. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information. *Proceedings of 18th European Conference “Computer Vision – ECCV 2024”, Milan, September 29 – October 4, 2024*. Cham: Springer; 2024: 1–21. DOI:10.1007/978-3-031-72751-1\_1.
12. Sohan M, Sai Ram T, Rami Reddy ChV. A Review on YOLOv8 and its Advancements. *Proceedings of the International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics*. Singapore: Springer; 2024: 529–545. DOI:10.1007/978-981-99-7962-2\_39.
13. Terven J, Cordova-Esparza DM, Romero-González JA. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023;5(4): 1680–1716. DOI:10.3390/make5040083.
14. Shorten C, Khoshgoftaar TM. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *Journal of Big Data*. 2019;6: 60. DOI:10.1186/s40537-019-0197-0.
15. Zoph B, Cubuk ED, Ghiasi G, et al. Learning data augmentation strategies for object detection. *Preprint arXiv.org*, 2019. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1906.11172> (Accessed 29 April 2024).
16. Ghaffar MAA, McKinstry A, Maul T, et al. Data augmentation approaches for satellite image super-resolution. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;IV-2/W7: 47–54. DOI:10.5194/isprs-annals-IV-2-W7-47-2019.
17. Chen L, Wu Y, Stegmaier J, et al. SortedAP: Rethinking evaluation metrics for instance segmentation. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*. Paris: IEEE; 2023: 3925–3931. DOI:10.1109/ICCVW60793.2023.00424.

**AUTHORS** **Alisher G. Saidov**

Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia  
33rd Department, Military Institute (Research)

**Denis V. Zhukov**

Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia  
33rd Department, Military Institute (Research)  
PhD in Engineering

Submitted: April 09, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



# Проблема сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости: анализ текущих исследований

Д.В. Байгобылов<sup>1</sup>✉, М.В. Литвиненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

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

✉ di-ma-b@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Байгобылов Д.В., Литвиненко М.В. Проблема сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости: анализ текущих исследований // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 96–109. DOI:10.30533/GiA-2025-025.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** вид разрешенного использования, объект капитального строительства, земельный участок, недвижимость, землепользование, градостроительное регулирование

**АННОТАЦИЯ** В современных условиях развития градостроительного законодательства особую значимость приобретает вопрос сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости, установленного при вводе объектов капитального строительства в эксплуатацию и выкупе земельного участка в собственность. Данная проблематика находится на пересечении различных отраслей права и требует комплексного научного осмысления, а также составляет основу для создания условий устойчивого развития территорий. Анализ публикационной активности по данной теме позволяет выявить основные тенденции и наиболее актуальные направления в развитии научной мысли. Методологическую основу исследования составляет комплексный анализ научных публикаций в ведущих рецензируемых изданиях за 2014–2024 годы. В ходе исследования были, в частности, проанализированы материалы, индексируемые в системах РИНЦ, Scopus и Web of Science, что позволило получить репрезентативную выборку научных работ по рассматриваемой проблематике и выявить успешные зарубежные практики. Анализ публикационной активности показывает, что научное сообщество концентрирует внимание на нескольких ключевых аспектах рассматриваемой темы: теоретическом осмыслении правовой природы вида разрешенного использования объектов недвижимости, практических аспектах сохранения вида разрешенного использования, проблемах правоприменения и путях их решения.

## 1 Введение

Вопрос сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости становится все более актуальным в условиях изменений градостроительной политики субъектов Российской Федерации и растущих потребностей современного общества. Проблема сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости затрагивает интересы различных сторон: государства, застройщиков, проектировщиков, а также конечных пользователей, таких как арендаторы, собственники или жители населенного пункта. Эта проблема становится особенно выраженной в крупных городах, для которых характерны значительные потоки инвестиций, застройка земельных участков, изменение функций земельных участков и зданий, что требует систематического подхода к управлению разрешенным использованием и решению возникающих при этом противоречий. Важно отметить, что исследование проблемы сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости актуально не только для обеспечения правовой устойчивости, но в первую очередь для предотвращения экологических и социальных последствий, финансовых потерь государства при налогообложении, которые могут возникнуть при неправильном использовании введенных в эксплуатацию объектов. Понимание основных направлений исследований и трендов развития в этой области позволит предложить методику комплексного решения вышеперечисленных вопросов.

Анализ публикационной активности по проблеме сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости показывает возросший интерес научного сообщества к различным аспектам этого вопроса. Согласно международным наукометрическим базам данных, количество публикаций по данной тематике увеличилось на 47 % с 2014 по 2019 год [1]. Сравнительный анализ публикационной активности российских и зарубежных ученых по вопросам сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости показывает, что эта тема привлекает значительное внимание в международной практике. В последние годы (во многом благодаря глобализации и обмену опытом между специалистами из разных стран) появилась необходимость изучения международных подходов к данной проблеме. Особое внимание исследователей привлекают вопросы гармонизации национальных подходов к регулированию видов разрешенного использования с международными стандартами. В европейских странах активно развивается концепция устойчивого градостроительства, которая предполагает сбалансированный подход к сохранению исторического наследия и развитию современной городской инфраструктуры.

В условиях дефицита качественной информации о действующих нормах и нововведениях многие исследователи сталкиваются с трудностями в формулировании четких выводов и предложений. Это также может ограничить возможности для конструктивного диалога между государственными органами, исследовательскими институтами и обществом в целом. В связи с этим комплексное и глубокое аналитическое исследование, касающееся вопросов сохранения видов разрешенного использования объектов недвижимости, является, безусловно, актуальным.

Цель данного исследования заключается в анализе публикационной активности российских и зарубежных исследователей в области сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости, установленного при вводе объектов капитального строительства в эксплуатацию и выкупе земельного участка в собственность.

## 2 Материалы и методы

В рамках данного исследования был проведен комплексный анализ публикационной активности как зарубежных, так и российских ученых по проблематике

сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости. Основным методологическим инструментарием выступил библиометрический анализ научных публикаций, индексируемых в ведущих международных и российских базах данных.

Для проведения исследования были использованы следующие базы данных: Web of Science Core Collection, Scopus, РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), Google Scholar. Период охвата публикаций составил 10 лет (2014–2024 гг.). Это позволило проследить динамику научного интереса к исследуемой проблематике и выявить основные тенденции в развитии научной мысли. Количество публикаций, отобранных для проведения исследования, составило 28 единиц (= 100 %).

При формировании поисковых запросов использовались ключевые термины на английском и русском языках, включая различные вариации и комбинации понятий «вид разрешенного использования», «объект капитального строительства», «землепользование», «земельный участок», «градостроительное регулирование».

Обработка полученных данных проводилась с помощью количественного (подсчет количества публикаций по ключевым терминам) и качественного (анализ аннотаций и полных текстов для выявления ключевых аспектов проблемы и классификация публикаций по тематическим направлениям) анализа динамики публикационной активности.

### 3 Результаты и обсуждение

Рассмотрим ключевые термины, ставшие предметом исследования. Вид разрешенного использования — это важное для градостроительного регулирования понятие, которое определяет цели и характер использования земельного участка и (или) объектов капитального строительства.

Понятие «вид разрешенного использования объектов недвижимости», не закрепленное напрямую в законодательстве Российской Федерации, является производным от ключевых понятий земельного и градостроительного законодательства, регулирующих использование земельных участков и расположенных на них объектов капитального строительства. В данной статье термином «вид разрешенного использования объектов недвижимости» обозначается разрешенное использование земельного участка, на котором расположен объект капитального строительства, определяющее допустимые виды деятельности, осуществляемой как на самом земельном участке, так и в (на) этом объекте. Иными словами, вид разрешенного использования объекта недвижимости — это набор возможных способов эксплуатации объекта капитального строительства, ограниченный рамками закона и обусловленный видом разрешенного использования земельного участка, на котором данный объект расположен. По нашему мнению, данное понятие отражает связь между земельным участком и находящимся на нем объектом капитального строительства, при которой функциональное назначение последнего определяется и ограничивается разрешенным использованием первого.

Классификация видов разрешенного использования в Российской Федерации осуществляется на основе действующих нормативно-правовых актов — Градостроительного кодекса и связанных с ним документов. Они определяют, какие виды работ и деятельности возможны для конкретного участка и объектов на нем в соответствии с функциональным назначением данной территории. Важно отметить, что соблюдение режима использования, установленного для участка и объекта капитального строительства, расположенного на нем, является обязательным условием для законной эксплуатации, что, в свою очередь, влияет на целостность и планомерное развитие городской структуры. Существует множество категорий видов разрешенного использования, каждая из которых охватывает разнообразные аспекты — от жилых застроек

до производственных территорий. В Российской Федерации основным документом, регулирующим эти вопросы, является классификатор видов разрешенного использования земельных участков<sup>1</sup>, который содержит подробное описание всех видов разрешенного использования, включая жилые, общественно-деловые, производственные, сельскохозяйственные и др. Он используется для определения допустимых видов деятельности на земельных участках и объектах капитального строительства.

В рамках научных исследований и практики сохранение вида разрешенного использования объектов недвижимости становится актуальной темой, поскольку любое изменение в этих параметрах может повлечь за собой широкий спектр последствий, включая правовые споры, конфликты интересов, ущерб государству, угрозу безопасности людей.

Вид разрешенного использования также носит стратегически важный характер для планирования территорий, поскольку служит основой для градостроительной политики на уровне муниципалитетов и регионов. Как отмечается в научной литературе, «вид разрешенного использования является одной из важнейших характеристик земельного участка, поскольку именно он определяет, какие объекты капитального строительства могут быть возведены правообладателем на данном участке» [2, с. 63]. Такие виды, как общественная застройка, торговые площади, жилая или промышленная застройка, структурируют городскую среду и обеспечивают сбалансированное развитие инфраструктуры, жилищного фонда и социальных услуг для различных групп населения.

При этом изменение вида разрешенного использования, особенно в целях коммерческой выгоды, требует соблюдения установленных правил (согласование с органами местного самоуправления, проведение публичных слушаний, учет интересов общества). Это говорит о том, что разрешенное использование — не просто техническая характеристика участка, а ключевой элемент градостроительного регулирования, закреплённый в правилах землепользования и застройки и обязательный для исполнения всеми правообладателями (ст. 85 Земельного кодекса РФ, ст. 39 Градостроительного кодекса РФ) [2].

Объект капитального строительства представляет собой материальное сооружение, созданное в результате осуществления строительных работ и обладающее определенными параметрами, которые делают его самостоятельным элементом городской или сельской инфраструктуры. Согласно российскому законодательству, объект капитального строительства может включать в себя жилые и нежилые здания, сооружения, а также подземные и надземные конструкции, такие как мосты, опоры линий электропередач и тоннели. Каждый такой объект необходимо вводить в эксплуатацию согласно установленным нормативам и требованиям, что служит гарантией его соответствия современным стандартам безопасности и функциональности. Понятие объекта капитального строительства охватывает не только физическую составляющую, но и правовые аспекты, связанные с его использованием, проектированием, строительством и эксплуатацией [3].

Одной из ключевых характеристик объекта капитального строительства является его разрешенное использование, которое определяется в проектной документации и регламентируется градостроительным законодательством. Разрешенное использование объекта указывает на то, каким образом и для каких целей данный объект может быть использован в соответствии с градостроительной политикой муниципального образования, включает в себя определение социальной нагрузки объекта, его соответствие установленным нормам и требованиям, а также влияние на соседние участки и объекты. Правильное применение данного понятия играет важную роль в планировании и управлении территорией, поскольку способствует обеспечению сбалансированного

---

1 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 10 ноября 2020 г. № П/0412 «Об утверждении классификатора видов разрешенного использования земельных участков». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012160040> (дата обращения: 18.01.2025).

развития городской среды и минимизации возможных конфликтов интересов между различными пользователями земельных ресурсов. По сути, разрешенное использование является основным параметром, отталкиваясь от которого можно говорить о функциональности и легитимности объекта в рамках существующих норм и требований [4].

Анализ публикационной активности зарубежных ученых в данной области позволил выявить несколько ключевых направлений исследований:

- 1) акцент делается на экономических аспектах, связанных с изменением вида разрешенного использования, в том числе исследуется влияние изменения вида разрешенного использования на стоимость недвижимости и инвестиционную привлекательность территорий, зачастую с использованием моделей гедонистического ценообразования для оценки влияния различных факторов, включая вид разрешенного использования, на стоимость объектов недвижимости [5];
- 2) значительное внимание уделяется не только правовым аспектам и механизмам регулирования вида разрешенного использования, но и анализу практики применения зонирования и других инструментов градостроительного регулирования в контексте изменения вида разрешенного использования (в частности, рассматриваются вопросы, связанные с получением разрешений на изменение вида разрешенного использования, процедурами общественных слушаний и судебными спорами, а также подчеркивается важность четких и прозрачных правил, обеспечивающих предсказуемость и защиту прав собственников и других заинтересованных сторон [6]);
- 3) активно исследуются вопросы, связанные с адаптивным повторным использованием зданий и сооружений, а именно рассматриваются примеры успешной трансформации промышленных и коммерческих объектов в жилые и общественные пространства; подчеркивается роль инновационных архитектурных решений и градостроительных стратегий в обеспечении устойчивого развития городов и сохранения культурного наследия [7].

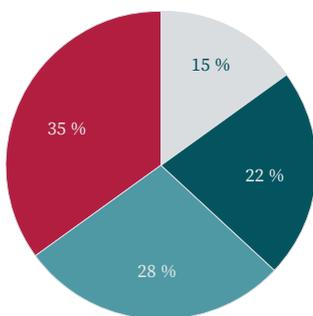
Анализ тематики российских публикаций с использованием таких ключевых понятий, как «вид разрешенного использования», «объект капитального строительства», «землепользование», «земельный участок», «градостроительное регулирование», показывает распределение, приведенное на рис. 1. Проблематика публикаций и их статус представлены в табл. 1.

**Рис. 1** ▼

Основные направления российских публикаций, отобранных по ключевым терминам

**Fig. 1**

The main directions of Russian publications on key terms



Условные обозначения

- правовые аспекты
- технические решения
- экономические вопросы
- экологические аспекты

**Таблица 1** ▶

Статус и проблематика публикаций по теме исследования

**Table 1**

The status and the problems of publications on the research topic

\* Базы данных и перечни, в которые входят издания с анализируемыми публикациями

Базы данных и перечни*	Проблематика публикаций	Количество публикаций, %
Web of Science Core Collection	Публикации, посвященные теоретическим и методологическим аспектам регулирования землепользования и градостроительства на международном уровне (в том числе статьи, предлагающие новые подходы к управлению развитием территорий и учитывающие различные виды разрешенного использования)	6,4
Scopus	Статьи, в которых рассматриваются практические аспекты применения градостроительного регулирования и землепользования, а также представлен анализ конкретных кейсов и примеры успешного опыта	9,2
БАК	Статьи, посвященные вопросам совершенствования законодательства в сфере землепользования и градостроительства, а также анализу регионального опыта регулирования видов разрешенного использования и объектов капитального строительства	38,7
РИНЦ	Статьи, в которых освещаются вопросы развития территорий, планирования, зонирования, управления земельными ресурсами, проведена оценка эффективности градостроительных решений	29,6
Google Scholar	Материалы конференций, отчеты об исследованиях и другие публикации по вопросам сохранения вида разрешенного использования объектов недвижимости	7,5
Другие	Тезисы докладов на научных конференциях, семинарах и других мероприятиях, посвященных вопросам землепользования, градостроительства и регулирования видов разрешенного использования	8,6

Преобладание правовой тематики в публикациях обусловлено постоянным совершенствованием законодательной базы в сфере градостроительства и землепользования. Значительное внимание уделяется вопросам определения видов разрешенного использования земельных участков, что напрямую влияет на возможности освоения и застройки последних [8]. Правовые публикации охватывают широкий спектр вопросов, включая процедуры изменения категорий земель, согласования строительства, реконструкции объектов капитального строительства с целью изменения вида разрешенного использования, а также анализ судебной практики (рис. 2).

Особое место в правовых публикациях занимает анализ судебной практики по земельным спорам. Авторы исследуют прецеденты, связанные с оспариванием градостроительных решений, нарушениями при смене вида разрешенного использования земельных участков и конфликтами между собственниками смежных территорий [9]. Значительное внимание уделяется вопросам правового регулирования застройки в границах охранных зон и территорий с особым режимом использования (рис. 3).

Публикации технического характера составляют вторую по объему категорию материалов. В них рассматриваются инновационные подходы к территориальному планированию, современные методы проектирования объектов капитального строительства и технологии информационного моделирования в градостроительстве. Авторы уделяют значительное внимание вопросам цифровизации градостроительной документации и внедрению геоинформационных систем в практику территориального планирования [10].

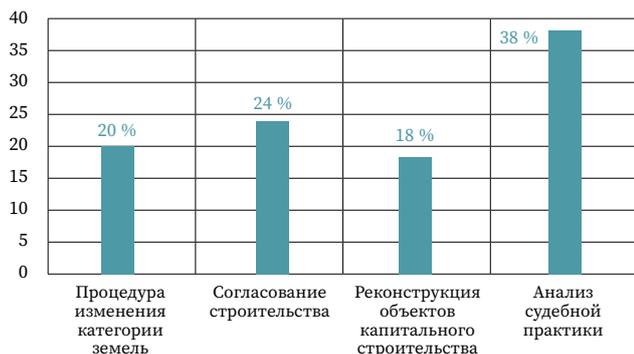
Существенная часть технических публикаций посвящена методам оценки влияния новых объектов капитального строительства на существующую застройку и инженерную инфраструктуру. Рассматриваются вопросы оптимизации транспортных потоков, развития инженерных сетей и обеспечения безопасности строительства в сложных геологических условиях (рис. 4).

**Рис. 2** ⬇

Вопросы, наиболее часто рассматриваемые в правовых публикациях о сохранении вида разрешенного использования объекта капитального строительства после его ввода в эксплуатацию

**Fig. 2**

The most discussed issues in legal publications on the topic: "Preservation of the type of permitted use of the capital construction facility after its commissioning"



**Рис. 3** ⬇

Тематика публикаций, посвященных анализу судебной практики по земельным спорам

**Fig. 3**

The subject of publications on the analysis of judicial practice on land disputes

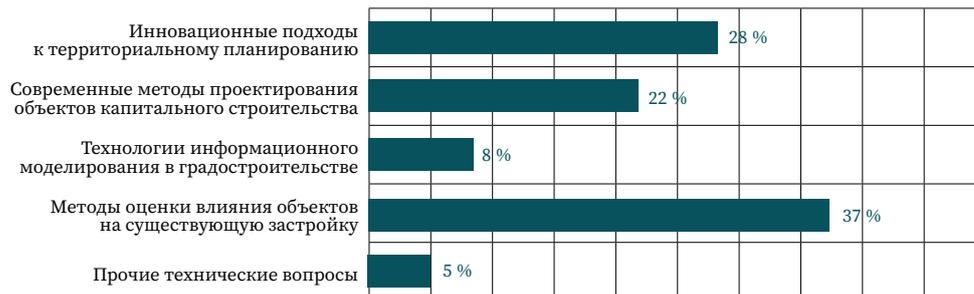


**Рис. 4** ⬆

Вопросы, наиболее часто рассматриваемые в публикациях технического характера

**Fig. 4**

The most discussed issues in technical publications



Экономическая составляющая градостроительной деятельности раскрывается через анализ инвестиционной привлекательности территорий с различными видами разрешенного использования. В публикациях этой категории исследуется влияние градостроительных регламентов на рыночную стоимость земельных участков и объектов капитального строительства, расположенных на них. Значительное внимание уделяется вопросам экономической эффективности различных вариантов использования территорий. В экономических публикациях также рассматриваются механизмы государственно-частного партнерства в градостроительной сфере, методы оценки экономической целесообразности изменения видов разрешенного использования земельных участков и финансовые аспекты реализации крупных градостроительных проектов.

Несмотря на меньшую долю публикаций, экологическая тематика приобретает все большее значение в контексте устойчивого развития территорий. Авторы данных работ исследуют влияние различных видов разрешенного использования земельных участков на экологическое состояние территорий, анализируют методы минимизации негативного воздействия объектов капитального строительства на окружающую среду. Особое внимание уделяется вопросам сохранения зеленых насаждений в городах, организации экологического мониторинга территорий и внедрению экологически безопасных технологий в строительстве. Публикации также затрагивают проблемы рекультивации нарушенных земель и создания экологически устойчивых городских пространств [11].

Таким образом, разнообразие тематики российских публикаций по градостроительству и землепользованию отражает многослойный подход к развитию территорий. Правовые аспекты, находящиеся в центре обсуждений, обеспечивают стабильную базу для регулирования процессов, связанных с использованием и застройкой земель, тем самым способствуя снижению уровня конфликтности и облегчению планирования будущих проектов. Исследование судебной практики способствует формированию более детальных и защищенных правовых механизмов, устранению пробелов в законодательстве и усилению гарантий для участников рынка.

Вопрос сохранения разрешенного использования объектов недвижимости стал важным аспектом градостроительной политики большинства развитых стран. В частности, международный опыт демонстрирует разнообразие подходов к управлению земельными ресурсами и соблюдению разрешенных видов использования. Например, в Соединенных Штатах Америки действует система зонирования, при которой землепользование строго регламентируется местными органами власти. Эта система позволяет не только контролировать назначение зданий, но и предотвращать неблагоприятные изменения, которые могут угрожать сохранению исторической и культурной ценности строений и их окружения. В соответствии с Зональным кодексом, изменения в использовании объекта требуют обсуждения на общественных слушаниях, что обеспечивает вовлечение граждан в процесс принятия решений. Подобные нормы позволяют формировать устойчивые сообщества, где соблюдаются интересы как муниципалитетов, так и местных жителей. В странах Европейского союза, таких как Германия и Нидерланды, федеральные законы также акцентируют внимание на обязательности поддержания разрешенного использования. Например, в Германии вопрос сохранения вида разрешенного использования подпадает под действие закона о регулировании землевладения и градостроительства. Тем не менее, несмотря на наличие общей рамки законодательства, на практике выбор конкретных мер может зависеть от местных условий и потребностей. Страны также часто применяют методы последующего контроля за выполнением установленных норм, что позволяет вовремя реагировать на нарушения и защищать общественные интересы. Кроме того, третьи стороны, такие как архитектурные и градостроительные ассоциации, могут принимать активную роль в мониторинге соблюдения разрешенных видов использования, обеспечивая дополнительное давление на исполнение законодательства. Таким образом, зарубежные практики подчеркивают важность комплексного подхода, детального анализа и мониторинга использования

объектов недвижимости, что является необходимым элементом успешного и устойчивого градостроительства.

В подходах к регулированию сохранения разрешенного использования также интересен опыт Канады, где законодательство основано на принципах устойчивого развития и охраны окружающей среды. Поскольку Канада является федеративной структурой, каждая провинция устанавливает собственные нормы. Законы по планированию территорий в таких провинциях, как Онтарио<sup>2</sup> и Британская Колумбия<sup>3</sup>, требуют разработки стратегий по обеспечению устойчивого использования. В Австрии наблюдаются схожие тенденции: законодательство не только управляет разрешенными видами использования, но и выставляет четкие рамки для соблюдения норм по охране окружающей среды и культурного наследия (BMLFUW<sup>4</sup>, 2016). Включение местных сообществ в процесс принятия решения является обязательным условием, что подтверждает концепцию прав на благоприятную окружающую среду<sup>5</sup>, ранее получившую широкое распространение в различных программах Всемирной организации здравоохранения. Эти примеры подчеркивают, как важны многоуровневый подход к проблеме сохранения видов разрешенного использования объектов недвижимости, интеграция местных сообществ и фокусировка на устойчивом развитии, что не только способствует соблюдению законодательства, но и в целом улучшает качество зданий и инфраструктуры в различных странах.

Успешные практики управления использованием объектов капитального строительства тесно связаны с эффективностью административного, правового и планировочного контроля на всех этапах — от проектирования до эксплуатации. Важными аспектами являются разработка и внедрение системы мониторинга и анализ публикационной активности исследователей в этой области. Как показывает практика, зарубежные и российские авторы все активнее обсуждают вопросы, касающиеся изменений в правовом статусе и сохранения результатов разрешенного использования. Эти исследования формируют общую базу знаний, на основе которой можно выстраивать эффективные стратегии адаптации и управления. Примеры успешных практик включают создание специализированных кабинетов и комитетов, которые наблюдают за соблюдением норм и правил, а также регулярное обновление и корректировку существующих регуляторных актов. Важную роль в этом контексте играют и структурированные базы данных, которые помогают в сборе и анализе информации о действующих объектах капитального строительства и изменениях в их статусе.

Изучение международного опыта свидетельствует о существовании множества успешных моделей управления использованием объектов капитального строительства, что открывает возможности для улучшения российской практики. Основное внимание следует уделить изучению зарубежных моделей по использованию информационных технологий в управлении градостроительными процессами. Один из примеров успешного подхода можно наблюдать в странах Северной Европы, где действует система постоянного мониторинга использования объектов, а также внедряются принципы устойчивого градостроительства. Эта практика весьма эффективна для профилактики нарушений и изменения назначений объектов, что значительно снижает риск

2 Planning Act, R.S.O. 1990, chapter P.13. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osler.com/osler/media/Osler/Content/PDFs/Planning-Act-Bill-197-first-reading-extracts.pdf> (дата обращения: 18.01.2025).

3 Local Government Act, R.S.B.C. 2015, C. 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ltpm.ltsa.ca/local-government-act-rsbc-2015-c-1> (дата обращения: 18.01.2025).

4 BMLFUW (нем. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) — Федеральное министерство сельского и лесного хозяйства, окружающей среды и водного хозяйства Австрийской Республики.

5 The human right to a clean, healthy and sustainable environment: UN General Assembly Resolution A/RES/76/300, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.un.org/en/a/res/76/300> (дата обращения: 18.01.2025).

правовых конфликтов. Постоянный мониторинг не только улучшает контроль за использованием земель и построенных на них объектов капитального строительства, но и способствует созданию благоприятной инвестиционной среды, что позволяет обеспечить долговременное сохранение объектов капитального строительства и их функционального назначения [12].

Таким образом, международный опыт управления использованием объектов недвижимости является ценным ориентиром для развития отечественной практики в этой области. Интеграция таких элементов, как активное участие местных сообществ, внедрение устойчивых практик и использование информационных технологий, может значительно повысить эффективность российской градостроительной политики.

## 4 Выводы

Мониторинг публикационной активности по вопросам сохранения видов разрешенного использования объектов недвижимости показал, что основное направление, которое выбирают для борьбы с изменением вида использования, — это нормы права. Правоприменителям необходимо внедрять комплексный подход к исследованию и анализу нормативно-правовых актов, связанных с вопросами сохранения разрешенного использования в сфере капитального строительства. Для более эффективного применения норм права требуется создать и актуализировать справочные материалы, такие как:

- обзоры изменений законодательства;
- сборники судебной практики;
- методические рекомендации;
- базы данных нормативных актов;
- типовые документы и шаблоны;
- интерактивные справочники и алгоритмы;
- образовательные материалы;
- реестры рисков и типичных ошибок.

Данные справочные материалы помогут юристам и специалистам, работающим в данной области, акцентировать внимание на правовых оценках и возможных последствиях решений, касающихся изменения разрешенного использования. Важно осуществлять регулярный мониторинг изменений в законодательстве и практике применения права, а также учитывать накопленный опыт отечественных и зарубежных исследователей и практиков, что позволит правоприменителям избегать распространенных ошибок, связанных с недостаточным вниманием к деталям правоприменительной практики и нормам закона.

Анализ публикаций российских и зарубежных авторов подчеркивает необходимость более глубокой координации действий различных государственных структур и органов местного самоуправления по вопросам сохранения видов разрешенного использования объектов недвижимости. Рекомендуется создать межведомственные рабочие группы, осуществляющие мониторинг изменений разрешенного использования объектов и проводящие анализ соответствующих правоприменительных кейсов. В эти группы могут входить как представители государственных структур, так и эксперты из научной сферы и представители бизнеса, что позволит применять мультидисциплинарный подход к решению вопросов в данной области. Практические рекомендации, разработанные такими группами, могут служить основой для создания методических пособий и практических руководств для правоприменителей, что, в свою очередь, повысит качество принимаемых решений и их законность.

Меры, направленные на техническую сторону вопроса в части ведения автоматического мониторинга объектов, специализированного кадастрового учета для земельных участков, полученных без проведения торгов, и построенных на них объектов, не обсуждаются. В Российской Федерации для выявления

подобных нарушений широко используются как беспилотные летательные аппараты, так и личный выезд сотрудников Росреестра. До сегодняшнего дня для мониторинга сохранения (изменения) назначений объектов недвижимости нет постоянно действующего механизма. Все принимаемые государством меры реализуются только с учетом жалоб, обращений и предложений граждан, а также на основе анализа текущей ситуации и экспертных оценок. Это подчеркивает важность и необходимость изучения вопроса сохранения вида разрешенного использования объекта недвижимости с технической стороны. Одно из перспективных направлений — это создание методики особого кадастрового учета с целью блокировки смены вида разрешенного использования.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бородик К.А., Дикусар К.С., Богатов В.В. Тренды публикационной активности российских исследователей за период 2016–2020 гг. по данным международных баз научного цитирования Web of Science Core Collection и Scopus // Управление наукой и наукометрия. 2021. Т. 16, № 4. С. 571–595.
2. Чубело В.О., Вяткина Г.В. Виды разрешенного использования земельных участков и объектов капитального строительства // Землеустройство и земледелие: технологии и полевые опыты. Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2021. С. 63–64.
3. Кожанова С.Е. Методика предоставления разрешения на условно разрешенный вид использования земельного участка или объекта капитального строительства // Каталог научных и инновационных разработок ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»: сборник материалов по итогам научно-исследовательской деятельности. Омск: Омский ГАУ, 2022. С. 55–57.
4. Муратова А.С., Гиниятов И.А. К вопросу об использовании земельного участка и объекта капитального строительства в соответствии с условно разрешенным видом использования // Сборник материалов XV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 9 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. Т. 7. С. 252–259. DOI:10.33764/2618-981X-2019-7-252-259.
5. Porumb V.-A., Maier G., Anghel I. The impact of building location on green certification price premiums: Evidence from three European countries // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 272. P. 122080. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122080.
6. Domingo D., Palka G., Hersperger A.M. Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth // Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 69. No. 1-19. P. 102833. DOI:10.1016/j.scs.2021.102833.
7. Jaeger W.K. The effects of land-use regulations on property values // Environmental Law. 2006. Vol. 36. No. 1. P. 105–130.
8. Шавловский И.К. Проблемы, связанные с использованием земельного участка под вспомогательные виды разрешенного использования // Современные проблемы в развитии земельного законодательства: сборник материалов научной конференции, Москва, 18–22 апреля 2022 г. М.: Государственный университет по землеустройству, 2022. С. 198–205.
9. Анисимова А.С. Проблемы разграничения полномочий органов государственной власти Удмуртской Республики и органов местного самоуправления на примере предоставления услуги на условно разрешенный вид использования земельного участка или объекта капитального строительства // Обеспечение безопасности личности, общества и государства в условиях глобализации: правовые и организационные проблемы и перспективы: сборник статей 52-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ижевск, 25–26 апреля 2024 г. Ижевск: УдГУ, 2024. С. 31–39.
10. Меньшикова Е.П., Лола А.М., Лола У.А. ГИС (географическая информационная система) как элемент цифровизации градостроительства // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году: сборник научных трудов РААСН: в 2 т. М.: АСВ, 2020. Т. 1. С. 279–285.
11. Красногорская Н.Н., Ильмурзин И.Б., Курамшина Н.Г. и др. Проблемы рекультивации нарушенных земель (анализ патентных публикаций

реферативной базы Scopus) // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2018. № 1(139). С. 46–49.

12. Арсланов Р.Р. Предоставление разрешения на условно разрешенный вид использования земельного участка и объекта капитального строительства, основные проблемы // Обеспечение безопасности личности, общества и государства в условиях глобализации: правовые и организационные проблемы и перспективы: сборник статей 52-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ижевск, 25–26 апреля 2024 г. Ижевск: УдГУ, 2024. С. 44–50.

**АВТОРЫ Байгобылов Дмитрий Владимирович**

ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Петропавловск-Камчатский, Россия

 0009-0009-5364-2203

**Литвиненко Мария Васильевна**

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

кафедра землеустройства и кадастров, факультет управления территориями д-р пед. наук, канд. техн. наук, доцент

 0000-0003-3736-8346

**Поступила 20.02.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.**



# The problem of preserving the type of permitted use of real estate: analysis of current research

**Dmitriy V. Baigobylov<sup>1</sup>**✉, **Maria V. Litvinenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Scientific Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

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

✉ di-ma-b@mail.ru

**CITATION** Baigobylov DV, Litvinenko MV. The problem of preserving the type of permitted use of real estate: analysis of current research. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 96–109. DOI:10.30533/GiA-2025-025.

**KEYWORDS** type of permitted use, capital construction object, land plot, real estate, land use, urban planning regulation

**ABSTRACT** In modern conditions of development of urban planning legislation, the issue of preserving the type of permitted use of real estate objects established during the commissioning of capital construction facilities and the purchase of land into ownership is of particular importance. This issue is located at the intersection of various branches of law and requires a comprehensive scientific understanding, as well as forms the basis for creating conditions for sustainable development of territories. The analysis of publication activity on this topic allows us to identify the main trends in the development of scientific thought and identify the most relevant research areas. The methodological basis of the research is a comprehensive analysis of scientific publications in leading peer-reviewed publications for the period 2014–2024. In the course of the study, materials indexed in the RSCI, Scopus and Web of Science systems were analyzed, which allowed us to obtain a representative sample of scientific papers on the subject under consideration and identify successful practices from foreign experience. An analysis of publication activity shows that the scientific community is focusing on several key aspects of the problem under consideration: the theoretical understanding of the legal nature of the permitted use of real estate, the practical aspects of preserving the permitted use, and the problematic aspects of law enforcement and their solutions.

- REFERENCES**
1. Borodik KA, Dikusar KS, Bogatov VV. Trendy publikatsionnoj aktivnosti rossijskih issledovatelej za period 2016–2020 gg. po dannym mezhdunarodnyh baz nauchnogo tsitirovanija Web of Science Core Collection i Scopus [Trends in the publication activity of Russian researchers for the period 2016–2020 based on the data of international scientific citation databases Web of Science Core Collection and Scopus]. *Science Management and Scientometrics*. 2021;16(4): 571–595. (In Russian).
  2. Chubelo VO, Vjatkina GV. Vidy razreshennogo ispolzovanija zemelnyh uchastkov i obektov kapitalnogo stroitelstva [Types of permitted use of land plots and capital construction facilities]. *Land management and agriculture: technologies and field experiments*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University; 2021: 63–64. (In Russian).
  3. Kozhanova SE. Metodika predostavlenija razreshenija na uslovno razreshennyj vid ispolzovanija zemelnogo uchastka ili obekta kapitalnogo stroitelstva [Methodology for granting permission for a conditionally permitted type of use of a land plot or an object of capital construction]. *Catalog of scientific and innovative developments of Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin: collection of materials based on the results of scientific research activities*. Omsk: Omsk State Agrarian University; 2022: 55–57. (In Russian).
  4. Muratova AS, Giniyatov IA. K voprosu ob ispolzovanii zemelnogo uchastka i obekta kapitalnogo stroitelstva v sootvetstvii s uslovno razreshennym vidom ispolzovanija [On the use of a land plot and a capital construction object in accordance with a conditionally permitted type of use]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XV International scientific congress*. In 9 vols. Novosibirsk: SSUGT; 2019;7: 252–259. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2019-7-252-259.
  5. Porumb VA, Maier G, Anghel I. The impact of building location on green certification price premiums: Evidence from three European countries. *Journal of Cleaner Production*. 2020;272: 122080. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122080.
  6. Domingo D, Palka G, Hersperger AM. Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*. 2021;69(1-19): 102833. DOI:10.1016/j.scs.2021.102833.
  7. Jaeger WK. The effects of land-use regulations on property values. *Environmental Law*. 2006;36(1): 105–130.
  8. Shavlovsky IK. Problemy, svjazannye s ispol'zovaniem zemel'nogo uchastka pod vspomogatel'nye vidy razreshennogo ispol'zovanija [Problems associated with the use of land plots for auxiliary types of permitted use]. *Modern Problems in the Development of Land Legislation: Proceedings of the Scientific Conference, Moscow, April 18–22, 2022*. Moscow: State University for Land Use; 2022: 198–205. (In Russian).
  9. Anisimova AS. Problemy razgranichenija polnomochij organov gosudarstvennoj vlasti Udmurtskoj Respubliki i organov mestnogo samoupravlenija na primere predostavlenija uslugi na uslovno razreshennyj vid ispolzovanija zemelnogo uchastka ili obekta kapitalnogo stroitelstva [Problems of delimiting the powers of state authorities of the Udmurt Republic and local self-government bodies on the example of providing services for a conditionally permitted type of use of a land plot or a capital construction facility]. *Proceedings of the 52nd All-Russian Scientific-practical conference with international participation "Ensuring the security of the individual, society and the state in the context of globalization: legal and organizational problems and prospects"*, Izhevsk, April 25–26, 2024. Izhevsk: Udmurt State University; 2024: 31–39. (In Russian).
  10. Menshikova EP, Lola AM, Lola UA. GIS (geograficheskaja informacionnaja sistema) kak jelement cifrovizacii gradostroitel'stva [GIS (Geographic Information System) as an element of urban planning digitalization]. *Fundamental, Search and Applied Research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the Construction Industry of the Russian Federation in 2019: Proceedings of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: ASV Publishing House; 2020: 279–285. (In Russian).
  11. Krasnogorskaya NN, Ilmurzin IB, Kuramshina NG, et al. Problemy rekul'tivacii narushennyh zemel' (analiz patentnyh publikacij referativnoj bazy Scopus) [Problems of reclamation of damaged lands (analysis of patent publications in the Scopus Abstract Database)]. *Journal of Scientific Publications by Postgraduate Students and Doctoral Candidates*. 2018;1(139): 46–49. (In Russian).

12. Arslanov RR. Predostavlenie razresheniya na uslovno razreshennyj vid ispolzovaniya zemelnogo uchastka i obekta kapitalnogo stroitelstva, osnovnye problemy [Granting permission for a conditionally permitted type of use of a land plot and an object of capital construction, the main problems]. *Proceedings of the 52nd All-Russian Scientific-practical conference with international participation "Ensuring the security of the individual, society and the state in the context of globalization: legal and organizational problems and prospects"*, Izhevsk, April 25–26, 2024. Izhevsk: Udmurt State University; 2024: 44–50. (In Russian).

**AUTHORS** **Dmitriy V. Baigobylov**

Scientific Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

 0009-0009-5364-2203

**Maria V. Litvinenko**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
Department of Land Management and Cadastre, Faculty of Territorial Management  
Dr. of Sci. (Pedagogy), PhD in Engineering, Associate Professor

 0000-0003-3736-8346

**Submitted: February 20, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.**



# Применение BIM-технологий для автоматизированной трехмерной идентификации объектов недвижимости

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. Применение BIM-технологий для автоматизированной трехмерной идентификации объектов недвижимости // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 110–122. DOI:10.30533/GiA-2025-045.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** трехмерная идентификация объектов недвижимости, BIM-технологии, 3D-кадастр, лазерное сканирование, цифровая экосистема, нормативная база, интеграция BIM-платформ

**АННОТАЦИЯ** В работе представлено исследование перспектив применения BIM-технологий при решении задач трехмерной идентификации объектов недвижимости (ТИОН) с применением методов фотограмметрии и лазерного сканирования. В исследовании использованы материалы, полученные в ходе наземного лазерного сканирования объекта недвижимости, расположенного по адресу: г. Краснодар, ул. Московская, 2. Сканирование выполнено с помощью лазерного сканера Leica BLK360. Технологии лазерного сканирования обеспечивают создание детализированных 3D-моделей, интегрирующих геометрические признаки, что критически важно при учете сложных объектов. Для оценки возможностей BIM-моделирования проведено тестирование двух программных продуктов: Revit и Model Studio. В статье представлена поэтапная схема ТИОН. Результаты исследования подтверждают, что гибридный подход (автоматизация и ручная верификация) сокращает трудозатраты, а интеграция BIM с кадастровыми системами требует разработки открытых стандартов и образовательных программ для специалистов. Путь к автоматизированной с помощью BIM-технологий ТИОН лежит через распознавание геометрических и атрибутивных параметров объектов недвижимости, что обеспечит наполнение Единого государственного реестра недвижимости достоверными и актуальными данными. Как показало исследование, интеграция методов лазерного сканирования, фотограмметрии и нейросетевых алгоритмов в BIM-платформы позволяет преодолеть ключевые ограничения традиционных 2D-систем. Опыт Китая и Швеции указывает на необходимость поэтапного перехода к цифровой экосистеме, где 3D-модель становится основой для прозрачного управления недвижимостью.

# 1 Введение

В настоящее время наблюдается активное внедрение BIM-технологий в профессиональную сферу. Как указывают некоторые исследователи [1], BIM-моделирование на всех этапах строительства может не только значительно упростить работу и сократить сроки, но и минимизировать количество ошибок на объекте. В работе [2] подчеркивается, что BIM-моделирование позволяет рационально использовать сырье, ресурсы и трудовое время работников. Однако, несмотря на все преимущества технологии, в научных публикациях отмечаются и ее существенные недостатки. Например, создание трехмерных моделей требует значительных финансовых вложений в обучение специалистов, покупку лицензионного программного обеспечения (ПО) и высокоточного оборудования. Ключевыми проблемами применения BIM-технологий для работы с существующими объектами недвижимости остаются отсутствие единых стандартов актуализации кадастровых данных и недостаточное изучение этого вопроса в научных исследованиях. Только в одной статье [3] была предложена методика получения и обработки пространственной информации с последующей визуализацией в 3D-формате через фотограмметрическую съемку.

Между тем BIM-технологии способны изменить кадастровый учет, обеспечив автоматизированную трехмерную идентификацию объектов недвижимости (ТИОН). В существующих системах крайне сложно оперативно актуализировать данные из-за ручного ввода информации и фрагментарности источников. Традиционные методы часто приводят к ошибкам в определении границ, площадей или технических характеристик объектов, что усложняет разрешение споров и замедляет процессы регистрации [4].

Под ТИОН понимается процесс цифрового отображения, определения геометрических параметров объектов недвижимости и интеграции данных для учета, оценки и мониторинга. В России правовые основы для внедрения 3D-моделирования в кадастр сформировались в 2015 году, когда были разработаны стандарты для создания единой базы данных в рамках Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН)<sup>1</sup>, а также законодательно закреплено понятие «3D-модель объекта недвижимости»<sup>2</sup>. Указанная мера была направлена на цифровизацию учетных процессов, снижение правовых коллизий и повышение прозрачности сделок с недвижимостью.

Внедрение BIM в кадастровую деятельность позволит создать единую цифровую экосистему, где трехмерная модель объекта станет основой для хранения юридических, технических и экономических данных. Так, интеграция лазерного сканирования и фотограмметрии с BIM-платформами обеспечит точное отображение геометрии зданий, что критически важно для учета сложных объектов. Это не только автоматизирует обновление кадастровой информации, но и повысит прозрачность данных для государственных органов и собственников [4].

В ходе исследования необходимо было выполнить следующие задачи:

- 1) составить обзор процесса ТИОН;
- 2) сравнить отечественное и зарубежное ПО, применяемое при ручном моделировании объектов недвижимости;
- 3) выявить проблемы, возникающие при подготовке 3D-модели;
- 4) проанализировать возможную применимость автоматизированной ТИОН.

1 Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102054722> (дата обращения: 20.11.2024).

2 Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 18 декабря 2015 г. № 953 «Об утверждении формы технического плана и требований к его подготовке, состава содержащихся в нем сведений, а также формы декларации об объекте недвижимости, требований к ее подготовке, состава содержащихся в ней сведений». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201603090013> (дата обращения: 20.11.2024).

Опыт зарубежных стран демонстрирует разнообразие подходов к реализации 3D-кадастра. Швеция активно развивает 3D-кадастр и BIM-технологии в рамках национальной программы Smart Built Environment, направленной на цифровизацию процессов урбанизации, внедрение 3D-собственности, которое началось в 2004 году. В Стокгольме разработана 3D-модель кадастрового реестра, объединяющая 2D- и 3D-собственность, а также права на недвижимость. Учет ведется на основе цифровых 3D-планов [5]. В Китае для модернизации кадастровой системы разработана единая 3D-модель регистрации недвижимости (URER), соответствующая принципам 3D-кадастра. Ключевым элементом стала адаптация международного стандарта LADM (*англ.* Land Administration Domain Model), расширенного для учета особенностей китайского законодательства, таких как разделение прав на коллективные земли, строительные участки и природные ресурсы. Пилотные проекты внедрены в Шэньчжэне, где 3D-кадастр используется для управления правами на здания и землю [6].

Несмотря на активное развитие 3D-кадастра в зарубежных странах, полный переход к трехмерной регистрации пока не завершен ни в одном из государств. Это подтверждает актуальность дальнейших исследований и внедрения технологий, способных преодолеть существующие технические и нормативные барьеры.

## 2 Материалы и методы

В исследовании использованы материалы, полученные в ходе наземного лазерного сканирования объекта недвижимости, расположенного по адресу: г. Краснодар, ул. Московская, 2. Сканирование выполнено с помощью лазерного сканера Leica BLK360. Для оценки возможностей BIM-моделирования проведено тестирование таких программных продуктов, как Revit и Model Studio.

Методология исследования заключается в анализе возможностей технологии BIM-моделирования как одного из этапов ТИОН. При анализе текущей ситуации применения BIM-технологии были предложены пути к автоматизированной с помощью нейросети ТИОН через обучение большим количеством наборов данных.

Цель 3D-идентификации заключается в автоматизированном распознавании объектов недвижимости с помощью BIM-моделей, что позволит не только визуализировать, но и структурировать пространственные характеристики.

## 3 Результаты и обсуждение

ТИОН обеспечивает точное отражение геометрических свойств объектов недвижимости, недостижимое в традиционных 2D-системах кадастрового учета. Технология лазерного сканирования, лежащая в основе этого подхода, позволяет фиксировать пространственные параметры с высокой детализацией. Создание 3D-моделей на основе облаков точек требует сложной многоэтапной обработки данных, однако их применение в кадастре существенно повышает точность распознавания данных об объектах недвижимости. Это снижает риски ошибок, характерных для устаревших 2D-планов, где неточности в границах или описании объектов часто приводят к правовым конфликтам [7].

Процесс ТИОН с применением BIM-моделирования можно представить в виде блок-схемы (рис. 1). ТИОН включает в себя несколько ключевых этапов, каждый из которых оказывает влияние на точность распознавания итоговой цифровой модели.

**Рис. 1** 

Процесс трехмерной идентификации объектов недвижимости с применением BIM

**Fig. 1**

The process of 3D identification of real estate objects using BIM



*Этап 1* — сбор и первичная обработка данных (получение детализированного облака точек, фиксирующего пространственные характеристики объекта).

*Этап 2* — обработка облака точек (фильтрация точек, удаление шумов и сшивка облаков для формирования целостной и корректной цифровой модели объекта).

*Этап 3* — моделирование объекта недвижимости (интерпретация облака точек и построение 3D-модели, учитывающей геометрические особенности здания).

*Этап 4* — наполнение трехмерной модели актуальными атрибутивными данными, сравнение их с информацией, содержащейся в ЕГРН, если объект уже стоит на кадастровом учете, и с нормативными требованиями Росреестра.

*Этап 5* — формирование всех собранных сведений в формате XML для интеграции в Национальную систему пространственных данных (НСПД).

Далее каждый этап процесса ТИОН рассмотрен более подробно.

**Этап 1**

На первом этапе осуществляется первичный сбор данных с помощью технологий лазерного сканирования. Подходящим методом лазерного сканирования для целей ТИОН является наземное лазерное сканирование (рис. 2). Его ключевое преимущество заключается в возможности сканирования объекта с нескольких неподвижных позиций [8]. Это обеспечивает достоверность данных и минимизирует образование теневых зон. Если необходимо сканирование некоторого количества объектов, то можно использовать комбинированную съемку. Она позволит сократить временные затраты без потери качества работы [9]. Для оптимизации процесса рекомендуется применять методы наземного и мобильного лазерного сканирования (рис. 3).



**Рис. 2**  
Наземный лазерный сканер (фото Д.А. Гуры)  
**Fig. 2**  
Terrestrial laser scanner (photo by Dmitry A. Gura)

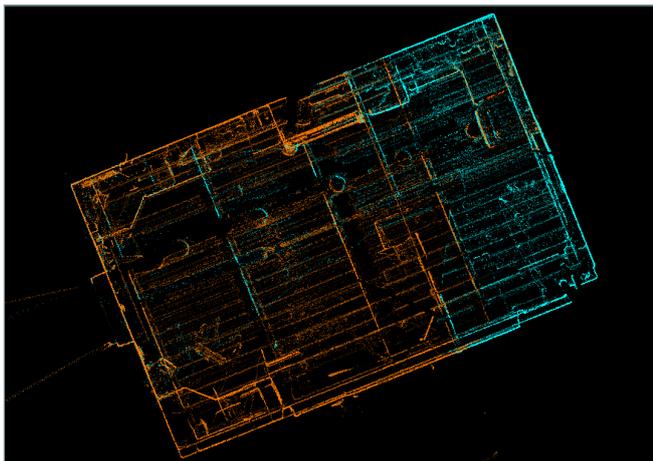


**Рис. 3**  
Мобильный лазерный сканер (фото Д.А. Гуры)  
**Fig. 3**  
Mobile laser scanner (photo by Dmitry A. Gura)

В контексте кадастровой деятельности допустимая погрешность измерений, согласно требованиям Росреестра, не должна превышать 10 см в плотной городской застройке. Это требование обеспечивает юридическую значимость результатов и их соответствие нормативным стандартам [10].

**Рис. 4**   
Регистрация станций лазерного сканирования в ПО Leica Geosystems

**Fig. 4**  
Registration of laser scanning stations in Leica Geosystems software



### Этап 2

Облако точек представляет собой массив неструктурированных данных, которые требуют специальной обработки перед использованием в BIM-среде. На втором этапе происходит сшивка станций для получения целостного облака точек и его импорт для дальнейшей обработки. С этой целью применяется специализированное ПО Leica Cyclone REGISTER 360 для экспорта данных из наземного лазерного сканера Leica BLK360 (рис. 4). Для регистрации сканов также можно использовать программу от российских разработчиков «Нанософт» с их модулем ReClouds, но она позволяет сшивать станции только с помощью марок, а не по характерным точкам.

После получения единого облака точек следует очистить его от шумов и артефактов для более точного понимания объекта и облегчения файла для дальнейшей работы. Процессы очистки облаков точек в зарубежной программе ReCap и в модуле Model Studio российских разработчиков существенно не различаются (рис. 5).

**Рис. 5**   
Облако точек учебного корпуса Б в программе ReCap и модуле Model Studio

**Fig. 5**  
Direction cloud of the current building B in ReCap and Model Studio programs

Облако до обработки в ПО ReCap / Cloud before processing in ReCap



Облако точек, обработанное в ПО ReCap / Saved point cloud in ReCap



Облако до обработки в ПО Model Studio / Cloud before processing in Model Studio



Облако точек, обработанное в ПО Model Studio / Modified point cloud in Model Studio



### Этап 3

При выборе ПО пользователь должен обратить внимание на технические характеристики и стоимость ПО, учитывать сложность освоения. Revit является одной из наиболее дорогостоящих BIM-платформ, требующей значительных инвестиций в лицензию и обучение специалистов [11]. Однако высокая стоимость оправдывается его функциональными возможностями и широким спектром сфер применения. Model Studio предлагает более доступную систему лицензирования и интуитивно понятный интерфейс, что делает его предпочтительным выбором для небольших проектных организаций.

Autodesk Revit представляет собой мощный инструмент для BIM-моделирования, который широко используется для создания сложных трехмерных моделей зданий и сооружений (рис. 6). Одной из ключевых особенностей Revit

**Рис. 6** ✓

Моделирование объекта недвижимости по облаку точек в ПО Revit

**Fig. 6**

Modeling a real estate object using a point cloud in Revit software

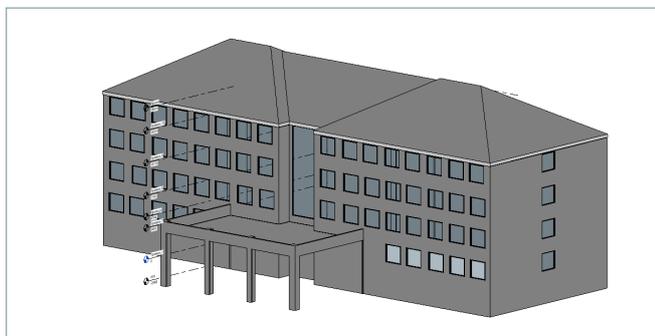


**Рис. 7** ✓

Модель LOD 200 учебного корпуса В

**Fig. 7**

Model LOD 200 of the educational building B



**Таблица 1** ✓

Сравнение основных характеристик ПО Revit и Model Studio

**Table 1**

Comparison of the main features of Revit and Model Studio

Характеристики	Autodesk Revit	Model Studio
Основное назначение	BIM-моделирование для сложных задач	
Функциональность	Высокая (параметрическое моделирование, работа с облаками точек)	Ограниченная (базовые функции для 2D и простых 3D-моделей)
Формат	RVT, DWG, DXF, IFC, SKP, ODBC и др.	DWG, DXF, DGN, IFC
Интерфейс	Сложный, требует времени на освоение, но многофункциональный	Простой и интуитивно понятный, подходит для начинающих
Доступность	Ограниченная	Полная
Стоимость	Годовая лицензия — 3425 евро (320 000 руб.)	Постоянная лицензия — 218 000 руб. Годовая лицензия — 131 000 руб.
Перспективы	Лидер рынка с постоянным обновлением функций	Потенциал для роста, но требует значительных инвестиций

является поддержка параметрического моделирования, что обеспечивает высокую точность и гибкость в проектировании. Программа интегрирована с другими продуктами Autodesk, такими как AutoCAD и Civil 3D, что значительно расширяет ее возможности для комплексного проектирования. Revit поддерживает широкий спектр форматов, включая собственный формат RVT, а также DWG, DXF, IFC, и ODBC, что делает его совместимым с большинством современных CAD- и BIM-систем. Особого внимания заслуживает возможность работы с облаками точек, позволяющая создавать точные модели на основе данных, полученных с помощью лазерного сканирования. Эта функция особенно востребована при реконструкции и реставрации объектов, где требуется высокая детализация. При всех своих неоспоримых достоинствах Revit обладает сложным интерфейсом, на освоение которого требуется много времени, что может быть препятствием для начинающих пользователей. Кроме того, высокая стоимость программы делает ее менее доступной для небольших компаний.

Отечественное ПО NanoCAD с модулем Model Studio позиционируется как более доступное решение, ориентированное на базовые задачи проектирования. После загрузки в NanoCAD облако точек можно редактировать. Revit не позволяет этого делать, редактировать исходные данные можно только в ReCap. NanoCAD также поддерживает создание 2D-чертежей и 3D-моделей, что делает его подходящим для начинающих пользователей, работает с такими популярными форматами, как DWG, DXF, DGN и IFC, т. е. обеспечивает базовую совместимость с другими CAD-системами [12]. Интерфейс программы отличается простотой и интуитивной понятностью, что облегчает ее освоение. Однако функциональность Model Studio в области BIM-моделирования ограничена по сравнению с Revit (табл. 1).

Для кадастрового учета достаточно уровня детализации LOD 200 (рис. 7). LOD 200 — это моделирование зданий и сооружений, при котором объекты представляются в виде обобщенной модели с геометрическими параметрами. Этот уровень оптимален

для кадастровой деятельности, т. к. обеспечивает баланс между достаточной информативностью и практичностью данных. LOD 200 предполагает создание обобщенных моделей объектов недвижимости с указанием их габаритов, пространственного расположения и функционального назначения, что полностью соответствует ключевым требованиям кадастра: идентификации объекта, определению границ, площади, этажности и координат без избыточной детализации конструктивных элементов (например, дверных и оконных проемов) [13].

На данный момент можно констатировать, что ПО Autodesk Revit длительное время доминировало на рынке BIM-технологий благодаря своей функциональности и глобальной стандартизации. Однако в условиях геополитических изменений и курса на импортозамещение, инициированного государственными программами, наблюдается устойчивый тренд перехода крупных компаний на отечественные аналоги. Несмотря на ограниченную функциональность ранних версий отечественных программ, их развитие демонстрирует потенциал для полного замещения Revit.

#### Этап 4

На четвертом этапе ТИОН происходит заполнение атрибутивных форм и формирование цифрового описания объекта недвижимости. Этап обеспечивает структурирование данных всех качественных и пространственных характеристик объекта. Подготовка конечного документа осуществляется с учетом требований, установленных Росреестром.

#### Этап 5

Интеграция сведений, полученных на предыдущих этапах, осуществляется посредством объединения информации в XML-формат с целью передачи сведений в НСПД при условии доработки XML-формата для внесения геопространственной информации (с учетом координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).

Несмотря на значительные преимущества BIM-технологий, процесс подготовки 3D-моделей для кадастрового учета сопровождается рядом технических сложностей.

1. *Высокая стоимость и сложность сбора данных.* Лазерное сканирование, являющееся основой для создания точных 3D-моделей, требует дорогостоящего оборудования (наземные и воздушные сканеры) и квалифицированных операторов. Например, наземное сканирование здания с детализацией внутренних помещений может занимать несколько дней, особенно при наличии теневых зон, требующих повторных измерений. Комбинирование методов (наземное и мобильное сканирование) частично решает проблему, но увеличивает бюджет проекта. Кроме того, обработка облаков точек требует мощных вычислительных ресурсов, что ограничивает доступность технологии для небольших организаций.
2. *Несовершенство алгоритмов автоматизации.* Даже современное ПО, такое как Autodesk ReCap или Cyclone REGISTER 360, не полностью автоматизирует процесс обработки данных. Фильтрация шумов, сшивка облаков часто требуют ручного вмешательства. Например, артефакты, возникающие из-за отражающих поверхностей или движущихся объектов (люди, транспорт), приходится удалять вручную, что замедляет процесс. Отечественные решения, такие как ReClouds, дополнительно ограничены необходимостью использования маркеров для регистрации сканов, что усложняет работу в условиях плотной застройки.
3. *Проблемы совместимости форматов и интеграции данных.* Разрыв между CAD-, BIM-платформами и кадастровыми системами остается значительным. Например, модели, созданные в Revit, требуют конвертации в форматы, совместимые с ЕГРН (XML-формат), что может приводить к потере атрибутивной информации. Кроме того, интеграция данных из разных источников (геодезические измерения, архивные планы, данные дронов) часто требует ручной корректировки из-за различий в системах координат или точности.

4. *Нормативные ограничения.* Требования Росреестра к погрешности измерений (не более 10 см в плотной городской застройке) [10] формально выполняются при использовании лазерного сканирования, однако нормативная база для 3D-кадастра остается неполной. Отсутствие четких стандартов оформления 3D-моделей (например, правил описания подземных коммуникаций или многоуровневых прав собственности) затрудняет их юридическое признание. Это особенно актуально для сложных объектов, таких как торговые центры с множеством арендаторов или инженерные сети, пересекающие несколько участков.
5. *Дефицит квалифицированных кадров.* Автоматизация процессов ТИОН на основе нейросетей обладает значительным потенциалом для преодоления перечисленных проблем, однако ее внедрение требует решения ряда методологических и технических задач. Современные архитектуры нейронных сетей, такие как PointNet++ и VoxelNet, демонстрируют высокую эффективность в сегментации и классификации трехмерных данных. Обученные на больших массивах данных, они способны автоматически выделять границы зданий, создавать контур земельных участков, идентифицировать инженерные сети и даже обнаруживать изменения в объектах (например, незарегистрированные пристройки). Нейросети могут использоваться для сравнения 3D-моделей с актуальными данными съемки, выявляя расхождения [14].

Автоматизированная ТИОН в пространстве также сопровождается некоторыми трудностями. Нейросети требуют обучения на размеченных наборах данных, которые должны отражать разнообразие условий (климат, архитектурные стили, плотность застройки). Недостаточная репрезентативность данных приводит к ошибкам, например ложному распознаванию временных сооружений как капитальных. На текущем этапе оптимальным решением является сочетание автоматической обработки нейросетями с ручной верификацией. Например, нейросеть может предварительно выделить потенциально проблемные участки, которые затем проверяются кадастровым инженером. Дальнейшее развитие алгоритмов, где нейросеть обучается на основе обратной связи от пользователя, позволит постепенно снижать долю ручного труда.

## 4 Выводы

Автоматизированная с помощью BIM-технологий ТИОН обеспечивается распознаванием геометрических и атрибутивных параметров объектов недвижимости, что позволит наполнить ЕГРН достоверными и актуальными данными. С помощью интеграции методов лазерного сканирования, фотограмметрии и нейросетевых алгоритмов в BIM-платформы можно преодолеть ключевые ограничения традиционных 2D-систем.

Проведенное исследование позволило сформулировать 4 ключевых вывода.

1. Анализ процесса ТИОН подтвердил, что использование наземного или комбинированного метода лазерного сканирования обеспечивает точность данных в пределах 10 см, соответствующую требованиям Росреестра. Однако процесс обработки облаков точек в ПО Cyclone REGISTER 360 требует ручной коррекции, что увеличивает время создания моделей. Это указывает на необходимость разработки алгоритмов автоматической фильтрации данных, особенно для плотной городской застройки.
2. Сравнение отечественного и зарубежного ПО показало, что Autodesk Revit, несмотря на функциональное превосходство (работа с параметрическими моделями, интеграция с AutoCAD), экономически недоступен для малых предприятий из-за высокой стоимости лицензии (320 тыс. руб/год). В то же время NanoCAD Model Studio, предлагая бюджетные решения (131 тыс. руб/год) и интуитивный интерфейс, существенно отстает в автоматизации процессов, таких как сшивка облаков точек без использования маркеров.

Опыт Швеции и Китая демонстрирует, что успешная интеграция BIM в кадастр возможна только при адаптации ПО к национальным стандартам, как это было реализовано в китайской системе URER на базе LADM.

3. Выявление проблем при подготовке 3D-моделей показало, что ключевыми барьерами остаются высокая стоимость оборудования (от 2 млн руб. для наземных сканеров), несовместимость форматов (RVT, XML) и дефицит кадров.
4. Анализ применимости трехмерной идентификации свидетельствует, что процесс технически осуществим, но его массовое внедрение потребует значительных ресурсов в виде набора данных и проверки получаемых результатов на первых этапах реализации.

Таким образом, внедрение автоматизированной ТИОН на базе нейросетей способно преодолеть ключевые ограничения традиционного кадастрового учета: снизить зависимость от человеческого фактора, ускорить обработку данных и повысить точность кадастрового учета объектов недвижимости. Однако для массового применения необходимо развитие нормативной базы, создание открытых наборов данных для обучения алгоритмов и интеграция инструментов нейросетей в BIM-платформы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта № НИП-20.1/22.16.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Сердюкова Е.А. BIM-моделирование как неотъемлемая часть современного строительства // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 5-2(68). С. 56–59. DOI:10.24412/2500-1000-2022-5-2-56-59.
2. Смышляева Е.Г. Актуальность использования BIM-технологий в строительной отрасли // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8, № 3. С. 279–282. DOI:10.33619/2414-2948/76/29.
3. Брылев И.С., Бударова В.А., Елисеева Н.С. Опыт подготовки пространственных данных для решения задач трехмерного моделирования объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 3. С. 145–156. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-3-145-156.
4. Рахмедьянов Ч.М., Чернов А.В., Ершов А.В. Анализ возможностей применения BIM для развития системы пространственных данных // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: сборник материалов XVIII Международного научного конгресса: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 7, № 1. С. 110–115.
5. Andree M., Paasch J., Paulsson J., et al. BIM and 3D Property Visualisation // Proceedings of the FIG Congress 2018 “Embracing our smart world where the continents connect: enhancing the geospatial maturity of societies”, Istanbul, Turkey, May 6–11, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2018/papers/ts06j/TS06J\\_andree\\_paasch\\_et\\_al\\_9367.pdf](https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2018/papers/ts06j/TS06J_andree_paasch_et_al_9367.pdf) (дата обращения: 25.09.2024).
6. Ying S., Guo R., Li L., et al. An uniform real-estate registration model for China // Proceedings of the 6th International FIG 3D Cadastre Workshop, Delft, The Netherlands, October 2–4, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://repository.tudelft.nl/file/File\\_95b5b98d-a51b-4807-8724-ded1d03fe099?preview=1](https://repository.tudelft.nl/file/File_95b5b98d-a51b-4807-8724-ded1d03fe099?preview=1) (дата обращения: 25.09.2024).
7. 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.
8. Шарафутдинова А.А., Брынь М.Я. Опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 1. С. 57–67. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67.
9. Комиссаров А.В., Ремизов А.В. Методика использования BIM-технологий и лазерного сканирования для реконструкции и модернизации объектов // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 2. С. 115–124. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-2-115-124.

10. Аврунев Е.И., Горобцов С.Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ: монография. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. 239 с.
11. Кречко И.К., Турук Ю.В., Колесниченко И.Е. Преимущества Revit над AUTOCAD при строительном проектировании // Современные прикладные исследования: материалы Четвертой национальной научно-практической конференции, Шахты, 16–18 марта 2020 года. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, 2020. С. 100–104.
12. Киевский И.Л., Крутяков О.А., Иванова О.А. и др. Опыт использования отечественных и импортных BIM-продуктов при проектировании жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 11. С. 42–48. DOI:10.33622/0869-7019.2020.11.42-48.
13. Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. An improved LOD specification for 3D building models // Computers, Environment and Urban Systems. 2016. Vol. 59. P. 25–37. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005.
14. Дьяченко Р.А., Гура Д.А., Беспятчук Д.А. и др. Подбор параметров обучения нейронной сети PointNext при сегментации точек лазерного отражения для государственного мониторинга земель // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 4. С. 135–144. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-4-135-144.

**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 27.11.2024. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# Application of BIM technology for automated 3D identification of real estate objects

**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. Application of BIM technology for automated 3D identification of real estate objects. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 110–122. DOI:10.30533/GiA-2025-045.

**KEYWORDS** 3D identification of real estate objects, BIM technologies, 3D cadastre, laser scanning, digital ecosystem, regulatory framework, integration of BIM platforms

**ABSTRACT** The paper presents a study of the prospects for using BIM technologies in solving problems of three-dimensional identification of real estate objects using photogrammetry and laser scanning methods. The study used materials obtained during terrestrial laser scanning of a real estate object located at the following address: Krasnodar, Moskovskaya St., 2. Scanning was performed using a Leica BLK 360 laser scanner. Laser scanning technologies ensure the creation of detailed 3D models that integrate geometric features, which is critically important for accounting for complex objects. To assess the capabilities of BIM modeling, two software products were tested: Revit and Model Studio. The scientific paper presents a step-by-step scheme for three-dimensional identification of real estate objects. The results of the study confirm that a hybrid approach (automation and manual verification) reduces labor costs, and the integration of BIM with cadastral systems requires the development of open standards and educational programs for specialists. The path to automated three-dimensional identification of real estate objects using BIM technologies lies through the recognition of their geometric and attribute parameters, which will ensure that the Unified State Register of Real Estate is filled with reliable and up-to-date data. As the study showed, the integration of laser scanning methods, photogrammetry and neural network algorithms into BIM platforms allows us to overcome the key limitations of traditional 2D systems. The experience of China and Sweden points to the need for a gradual transition to a digital ecosystem, where the 3D model becomes the basis for transparent real estate management.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of the scientific and innovative project No. NIP-20.1/22.16.

## REFERENCES

1. Serdyukova EA. BIM-modelirovanie kak neotemlemaja chast sovremennogo stroitelstva [BIM-modeling as an integral part of modern construction]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022;5-2(68): 56–59. DOI:10.24412/2500-1000-2022-5-2-56-59. (In Russian).
2. Smyshlyaeva EG. Aktualnost ispolzovaniya BIM-tehnologij v stroitelnoj otrasli [Relevance of using BIM technologies in the construction industry]. *Bulletin of Science and Practice*. 2022;8(3): 279–282. DOI:10.33619/2414-2948/76/29. (In Russian).
3. Brylev IS, Budarova VA, Eliseeva NS. Opyt podgotovki prostranstvennykh dannykh dlya resheniya zadach trekhmernogo modelirovaniya ob"ektov nedvizhimosti [Experience in preparing spatial data to solve problems of real estate objects 3D modeling]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(3): 145–156. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-3-145-156. (In Russian).
4. Rakhmed'yanov ChM, Chernov AV, Ershov AV. Analiz vozmozhnostey primeneniya BIM dlya razvitiya sistemy prostranstvennykh dannykh [Analysis of the possibilities of using BIM for the development of a system of spatial data]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVIII International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 7(1). Novosibirsk: SSUGT; 2022: 110–115. (In Russian).
5. Andree M, Paasch J, Paulsson J, et al. BIM and 3D Property Visualisation. FIG Congress 2018. Embracing our smart world where the continents connect: enhancing the geospatial maturity of societies, Istanbul, Turkey, May 6–11, 2018. Available from: [https://fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2018/papers/ts06j/TS06J\\_andree\\_paasch\\_et\\_al\\_9367.pdf](https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2018/papers/ts06j/TS06J_andree_paasch_et_al_9367.pdf) (Accessed 25 September 2024).
6. Ying S, Guo R, Li L, et al. An uniform real-estate registration model for China. *Proceedings of the 6th International FIG 3D Cadastre Workshop, Delft, The Netherlands, October 2–4, 2018*. Available from: [https://repository.tudelft.nl/file/File\\_95b5b98d-a51b-4807-8724-ded1d03fe099?preview=1](https://repository.tudelft.nl/file/File_95b5b98d-a51b-4807-8724-ded1d03fe099?preview=1) (Accessed 25 September 2024).
7. Brylev IS, Budarova VA. Primenenie kompleksa tsifrovyykh tekhnologiy dlya formirovaniya trekhmernogo ob"ekta nedvizhimosti gorodskogo prostranstva [Application of a digital technology complex to form a three-dimensional real estate object in urban space]. *Geodesy and Cartography*. 2024;85(3): 42–49. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1005-3-42-49. (In Russian).
8. Sharafutdinova AA, Bryn' MYa. Opyt primeneniya nazemnogo lazernogo skanirovaniya i informatsionnogo modelirovaniya dlya upravleniya inzhenernymi dannymi v techenie zhiznennogo tsikla promyshlennogo ob"ekta [The experience in using laser scanning and building information modeling for engineering data management during the life cycle of an industrial object]. *Vestnik SSUGT*. 2021;26(1): 57–67. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67. (In Russian).
9. Komissarov AV, Remizov AV. Metodika ispol'zovaniya BIM-tehnologiy i lazernogo skanirovaniya dlya rekonstruktsii i modernizatsii ob"ektov [Application BIM-technologies and laser scanning for reconstruction and modernization of objects]. *Vestnik SSUGT*. 2022;27(2): 115–124. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-2-115-124. (In Russian).
10. Avrunev EI, Gorobtsov SR. *Geodezicheskoye soprovozhdeniye kadastryykh rabot* [Geodetic support of cadastral works]. Novosibirsk: SSUGT; 2024. 239 p. (In Russian).
11. Krechko IK, Turuk YuV, Kolesnichenko IE. Preimushchestva Revit and AUTOCAD pri stroitel'nom proektirovanii [Benefits Revit over AUTOCAD when building design]. *Proceedings of the Fourth National Scientific and Practical Conference "Modern applied research", Shakhty, March 16–18, 2020*. Novocherkassk: Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); 2020: 100–104. (In Russian).
12. Kievskiy IL, Krutyakov OA, Ivanova OA, et al. Opyt ispol'zovaniya otechestvennykh i importnykh BIM-produktov pri proektirovanii zhilykh zdaniy [Experience in using domestic and imported BIM products when designing residential buildings]. *Industrial and civil construction*. 2020;11: 42–48. DOI:10.33622/0869-7019.2020.11.42-48. (In Russian).
13. Biljecki F, Ledoux H, Stoter J. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016;59: 25–37. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005.

14. D'yachenko RA, Gura DA, Bespyatchuk DA, et al. Podbor parametrov obucheniya neyronnoy seti PointNext pri segmentatsii toчек lazernogo otrazheniya dlya gosudarstvennogo monitoringa zemel' [Selection of training parameters of PointNext neural network for segmentation of laser reflection currents during state land monitoring]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(4): 135–144. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-4-135-144. (In Russian).

**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: November 27, 2024. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.**



# Применение метода динамической фазовой интерферометрии для исследования динамических процессов биообъектов

А.А. Охрименко<sup>1</sup>✉, А.В. Кретушев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>2</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ zloyzuzi@yandex.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Охрименко А.А., Кретушев А.В. Применение метода динамической фазовой интерферометрии для исследования динамических процессов биообъектов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 123–132. DOI:10.30533/GiA-2025-032.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** динамическая фазовая микроскопия, клеточные процессы, частотный анализ, фазовый портрет, интерференционный анализ, фотостимуляция, быстрое преобразование Фурье, светодиод

**АННОТАЦИЯ** В работе представлены результаты исследования динамических процессов в живых клетках буккального эпителия с использованием метода динамической фазовой микроскопии (ДФМ). Экспериментальная установка, созданная на основе модифицированного микроинтерферометра МИИ-4, обеспечила регистрацию нанометровых изменений фазовой высоты клеточных структур в реальном времени. Высокая пространственно-временная разрешающая способность методики позволила наблюдать внутриклеточные процессы без использования флуоресцентных меток и инвазивных вмешательств. Для анализа данных разработаны алгоритмы построения трек-диаграмм, пространственно-временных и пространственно-частотных портретов, обеспечивающих детальную визуализацию локальной клеточной активности. Тестирование системы на полупроводниковой пластине показало высокую стабильность инструмента (погрешность  $\pm 5$  нм), подтверждая надежность измерений. Исследование клеток показало наличие нестационарных процессов с амплитудой до 6–8 нм, локализованных преимущественно в области перехода между ядром и цитоплазмой. Пространственно-частотный анализ выявил преобладание компонент в диапазонах 0,01–0,07 и 0,16–0,245 Гц, что предположительно связано с активностью митохондрий, броуновским движением, синтезом белка, а также эффектами фотобиомодуляции цитохром-с-оксидазы

при воздействии инфракрасного излучения. Представленные результаты демонстрируют потенциал ДФМ для неинвазивного мониторинга внутриклеточной динамики и подчеркивают необходимость дальнейших исследований для установления точных корреляций между спектральными характеристиками и конкретными биологическими процессами.

## 1 Введение

В последние десятилетия исследования динамических процессов на клеточном и молекулярном уровне приобрели исключительную значимость в биологических и медицинских науках [1–3]. Постепенное углубление понимания механизмов, управляющих клеточными функциями и взаимодействиями молекул, открывает новые горизонты для диагностики и лечения различных заболеваний.

Одной из главных причин актуальности данного исследования является растущее число заболеваний, связанных с нарушением клеточной функциональности, включая рак, сердечно-сосудистые и нейродегенеративные болезни. Понимание динамики молекул и клеток в условиях различных физиологических и патофизиологических состояний позволяет не только улучшать диагностику и профилактику болезней, но и разрабатывать более эффективные терапевтические подходы.

Использование динамической фазовой микроскопии (ДФМ) и современных методов анализа фазовых изображений дает исследователям возможность получать больше информации о механизмах, лежащих в основе жизнедеятельности клеток.

## 2 Материалы и методы

В качестве основы для экспериментальной установки используется модифицированный микроинтерферометр МИИ-4, в котором реализован метод фазосдвигающей интерферометрии. На открытом языке программирования Processing были разработаны трех-, четырех- и пятишаговые алгоритмы для получения изображений с фазовым сдвигом в  $60^\circ$ . Кроме того, был разработан алгоритм построения трек-диаграмм для перехода от метода фазосдвигающей интерферометрии к методу ДФМ.

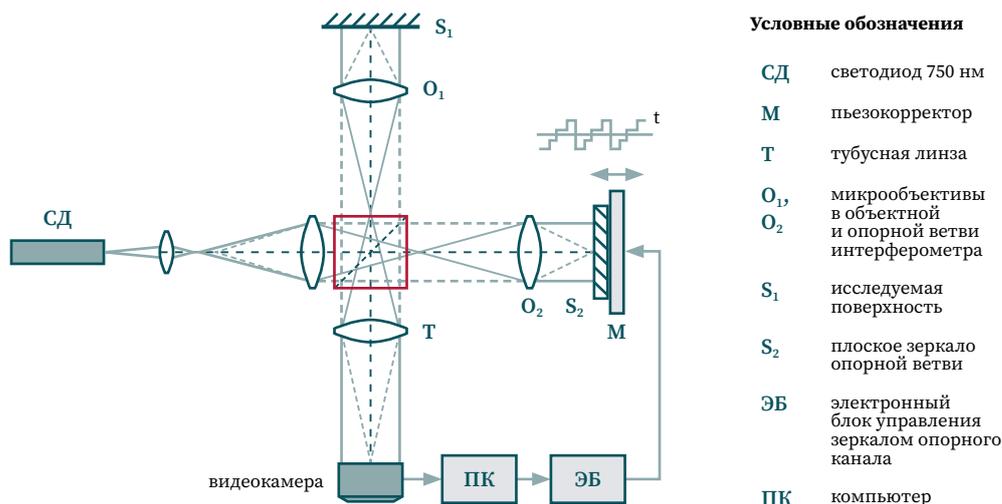
ДФМ представляет собой мощный инструмент для исследования клеток [4–5], позволяя получать детальные, высококачественные изображения живых клеток в реальном времени. Поскольку клеточная биология продолжает развиваться, такие методы, как ДФМ, становятся все более важными для понимания сложных и динамичных процессов, происходящих внутри клеток.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения используется инфракрасный светодиод, излучающий на длине волны 750 нм. Для наблюдения за получаемым изображением применяется камера с разрешением 1,3 мегапикселя. Камера транслирует изображение изучаемых объектов на компьютер. Для реализации внесения фазовых сдвигов в экспериментальной установке зеркало в опорном плече интерферометра было заменено склейкой из кремниевого зеркала и пьезокерамики.

Для анализа динамических процессов в исследуемых объектах было разработано программное обеспечение, получены развернутые фазовые изображения. Информация о процессах, как и в прошлом исследовании [6], извлекалась из трек-диаграммы  $h(x, t)$ , полученной в результате многократного периодического сканирования профиля фазовой высоты  $h(x)$  вдоль фиксированной горизонтально скан-линии. Развернутые фазовые изображения и трек-диаграмма тест-объектов представлены на рис. 2.

**Рис. 1**   
 Схема экспериментальной установки [6]

**Fig. 1**  
 The scheme of the experimental setup [6]



**Рис. 2**   
 Развернутые фазовые изображения клетки, полупроводниковой пластины и трек-диаграмма клетки

**Fig. 2**  
 Unwrapped phase images of the cell, semiconductor wafer, and cell track diagram



В результате была сформирована матрица значений  $h(x, t + p\tau)$ , где  $\tau$  представляет собой временную задержку между строками, а  $p$  — номер строки ( $p = 0, 1, 2, 3$  и т. д.), обеспечивающая равномерную выборку в определенной точке скан-линии. Анализ информации, содержащейся в  $h(x, t)$ , позволил визуализировать динамический процесс в любой точке скан-линии в виде пространственно-частотных портретов, корреляционных функций и других динамических характеристик.

### 3 Результаты

Эксперимент основывается на тестовых образцах, использованных в рамках предыдущего исследования [6]. В качестве опорного стационарного объекта для выявления шумов и неточностей работы экспериментальной установки выступала полупроводниковая пластина, а в качестве непосредственного объекта исследования — клетка буккального эпителия. Для обоих образцов в течение 16 мин. 36 с. велась запись трек-диаграмм, состоящая из 512 развернутых фазовых изображений. Шумы прибора вносят погрешность измерений, равную  $\pm 5$  нм. В предыдущем исследовании [6] установлено, что в течение эксперимента клетка показала рост от 12 до 16 % в области ядра, предположительно связанный с процессами фотобиомодуляции и активацией фермента цитохром-с-оксидазы [6–7].

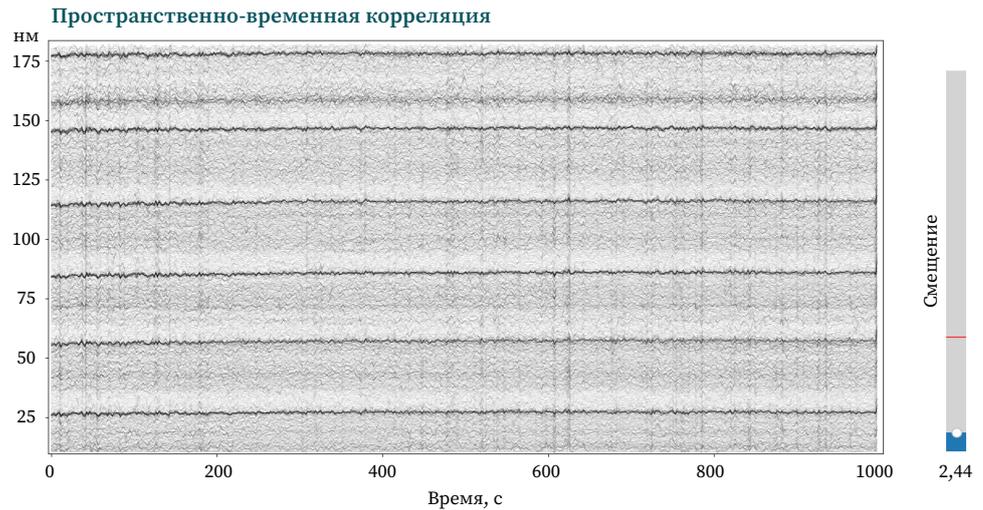
В результате проведенных экспериментов были получены портреты пространственно-частотного анализа, пространственно-временные портреты

**Рис. 3** ➔

Пространственно-временной портрет полупроводниковой пластинки

**Fig. 3**

Space-time portrait of a semiconductor wafer

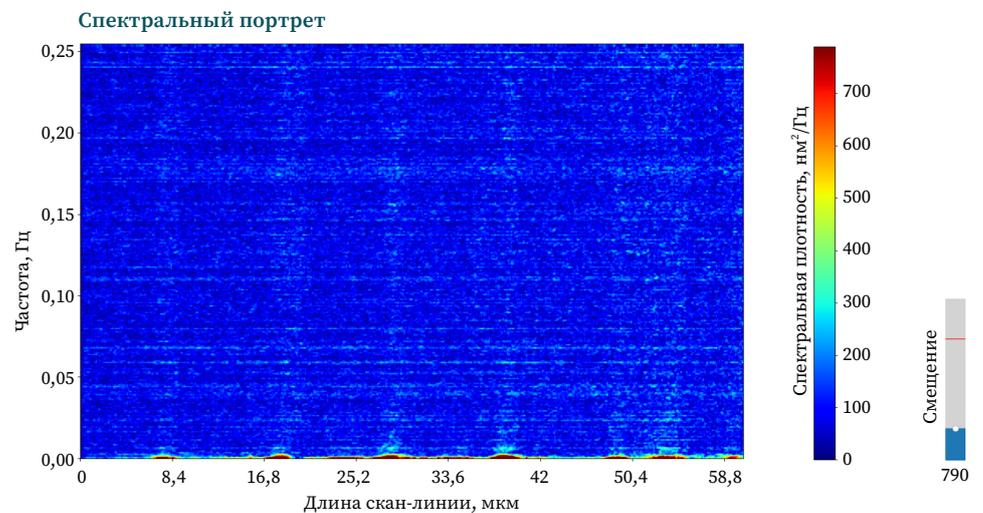


**Рис. 4** ➔

Пространственно-частотный портрет полупроводниковой пластинки

**Fig. 4**

Spatial-frequency portrait of a semiconductor wafer



для обоих тестовых образцов. На рис. 3 представлен пространственно-временной портрет полупроводниковой пластинки. Пространственно-временной портрет получается посредством вычитания среднего значения фазовой высоты и фильтрацией в ограниченном интервале частот.

На рис. 3 портрет представлен в виде набора последовательных сечений фазовых изображений исследуемых объектов для фиксированных точек скан-линии. Каждая линия отражает изменение во времени фазовой высоты. Для полупроводниковой пластинки характерно отсутствие пространственно-временной корреляции во флуктуациях фазовой высоты. Изменение фазовой высоты во времени не превышает шумов экспериментальной установки. Вертикальные линии имеют протяженность по всей длине оси  $Y$  и свидетельствуют об отсутствии локализации процессов в какой-либо области тестового образца. Данные линии имеют длительность порядка 1–4 с. и амплитуду 2–3 нм. Причина их возникновения, наиболее вероятно, связана с внешним воздействием на прибор, таким как вибрация, шум, включение света и т. д.

В пространственно-частотном портрете, приведенном на рис. 4, наблюдается практически полное отсутствие контрастных частотных компонент. Пространственно-частотный портрет представляет собой совокупность спектров Фурье для сигналов, зарегистрированных в каждой точке скан-линии.

Наблюдаемые частотные компоненты не локализованы и возникают вследствие внешних, внутренних шумов прибора, а также при резком изменении фазовой высоты объекта.

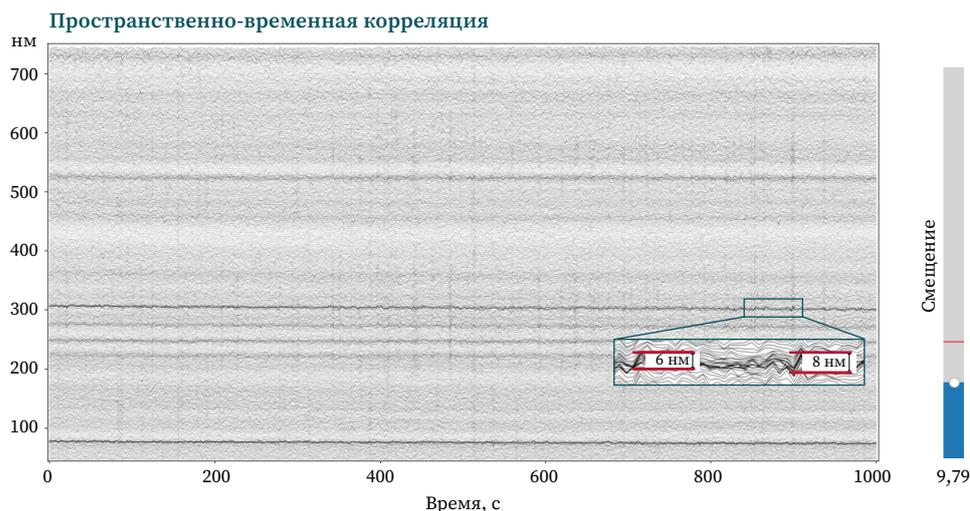
На рис. 5 приведен пространственно-временной портрет клетки буккального эпителия.

**Рис. 5** ➤

Пространственно-временной портрет клетки буккального эпителия

**Fig. 5**

Space-time portrait of buccal epithelial cells

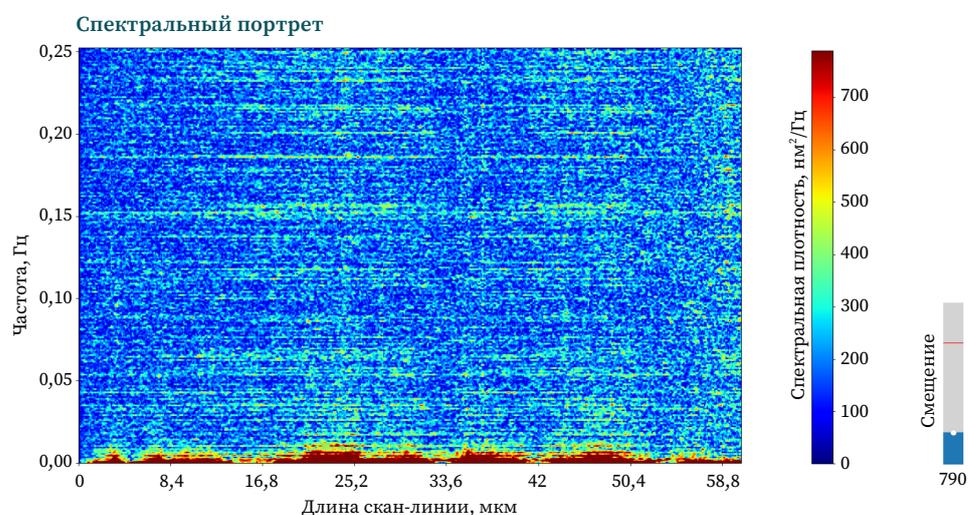


**Рис. 6** ➤

Пространственно-частотный портрет клетки буккального эпителия

**Fig. 6**

Spatial-frequency portrait of buccal epithelial cells



На рис. 5 наблюдается нестационарность процессов, наличие сигналов (вертикальные линии), локализованных в области перехода между ядром и цитоплазмой. Длительность характерных сигналов составляет 3–10 с. Максимальная амплитуда сигналов достигает 6–8 нм. Другая информация о пространственном распределении преобладающих частотных компонент может быть получена из пространственно-частотного портрета, представленного на рис. 6.

В пространственно-частотном портрете наблюдается преобладание компонент с частотами 0,01–0,04; 0,055–0,07; 0,16; 0,20; 0,215; 0,23–0,245 Гц. Протяженность и форма частотных компонент на обозначенных частотах практически совпадают с сигналами на пространственно-временном портрете клетки. Локализация контрастных частотных линий и локализация протяженных компонент в пространственно-временном портрете идентичны, что говорит о кооперативности процессов.

## 4 Обсуждение

Анализ пространственно-временных портретов полупроводниковой пластины подтвердил стабильность работы экспериментальной установки. Наблюдаемые кратковременные флуктуации (1–4 с., амплитуда 2–3 нм) соответствуют уровню шумов, обусловленных внешними и внутренними факторами (вибрации, изменение освещения, шумы прибора), что согласуется с данными

предыдущего исследования [6]. Отсутствием пространственно-временной корреляции и частотных компонент на рис. 3 и 4 подчеркивается статичность небиологического объекта.

Напротив, пространственно-временной портрет клетки буккального эпителия (рис. 5) выявил нестационарные процессы с локализацией сигналов в области перехода между ядром и цитоплазмой. На биологическое происхождение этих сигналов указывает их амплитуда (6–8 нм), которая превышает уровень шумов. Наблюдаемая длительность процессов (3–10 с.) и их пространственная кооперативность (совпадение локализации в пространственно-частотном и пространственно-временном портретах) могут быть связаны с активностью внутриклеточных структур. Из-за отсутствия исследований о длительности процессов, протекающих в клетке, невозможно однозначно утверждать, какие частотные компоненты соответствуют конкретным клеточным процессам. Поэтому дальнейшие тезисы могут рассматриваться только в качестве предположений.

Преобладание частотных компонент в диапазонах 0,01–0,04 и 0,23–0,245 Гц (рис. 6) могут согласоваться с известными временными масштабами клеточных процессов, включая циклы активности митохондрий и колебания уровня кальция [8–9], а также могут быть связаны с синтезом белка в клетке. Синтез одной молекулы белка, как отмечают некоторые исследователи, занимает от 30 с. до нескольких минут<sup>1</sup>, что соответствует частотам 0,03–0,01 Гц. Частотные компоненты 0,055–0,07 Гц могут являться следствием гликолиза. Остальные частоты предположительно относятся к эффектам, вызванным фотостимуляцией фермента цитохром-с-оксидазы, располагающегося во внутренней мембране митохондрий. Это приводит к изменениям в окислительно-восстановительных реакциях, протекающих в дыхательной цепи, а также усиливает протонный градиент и активность внутренней мембраны митохондрий [10]. Изменение мембранного потенциала митохондрий вызывает повышение уровня циклического аденозинмонофосфата и стимулирует синтез аденозинтрифосфата (АТФ) [11].

Важным аспектом является связь выявленных динамических характеристик с функцией цитохром-с-оксидазы, активация которой под воздействием инфракрасного излучения могла стимулировать рост в области ядра клетки [6]. Это предположение согласуется с локализацией сигналов в области ядра и подтверждает потенциал ДФМ для исследования механизмов фотобиомодуляции.

Методологические преимущества ДФМ, такие как высокая чувствительность (порядок нанометров) и возможность анализа в реальном времени, делают ее перспективной для изучения быстропротекающих процессов в живых клетках без необходимости использования флуоресцентных меток. Однако ограничениями метода остаются чувствительность к внешним шумам и необходимость строгого контроля условий эксперимента, что подчеркивает важность этапа калибровки на статических объектах.

## 5 Выводы

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность метода ДФМ для анализа динамических процессов на клеточном уровне. Разработанная экспериментальная установка на базе модифицированного микроинтерферометра МИИ-4 с алгоритмами фазового сдвига, записью и обработкой трека диаграмм позволила получить детализированные пространственно-временные и пространственно-частотные данные.

<sup>1</sup> Елаев А.В. Сравнительный анализ существующих методов определения лактатного порога. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://elibr.pnzgu.ru/library\\_doc/9657](http://elibr.pnzgu.ru/library_doc/9657) (дата обращения: 10.02.2025).

В результате исследования можно сделать следующие выводы.

1. Были выявлены динамические различия между статическими (полупроводниковая пластина) и биологическими (клетки буккального эпителия) объектами. В то время как для пластины характерны шумы, связанные с внешними воздействиями ( $\pm 5$  нм), в клетках обнаружены локализованные процессы с амплитудой до 8 нм, коррелирующие с активностью в области ядра и цитоплазмы.
2. Частотный анализ выявил преобладание частотных компонент в диапазонах 0,01–0,04; 0,055–0,07; 0,16–0,245 Гц, что предположительно связано с биологическими процессами: броуновским движением, синтезом белка, гликолизом, циклами митохондриальной активности, колебанием уровня кальция и фотостимуляцией митохондриального фермента цитохром-с-оксидазы.
3. В клетках буккального эпителия зарегистрированы сигналы с амплитудой 6–8 нм и длительностью 3–10 с., локализованные в области перехода между ядром и цитоплазмой. Данные процессы могут объяснять рост клетки на 12–16 % в области ядра.
4. Не рекомендуется зондировать клетки буккального эпителия при помощи источников света, работающих на длине волны, равной 750 нм, или близкой к ней, поскольку данное излучение оказывает непосредственное влияние на биологические объекты.

Полученные данные подчеркивают потенциал ДФМ для неинвазивного мониторинга внутриклеточной динамики в реальном времени. Однако интерпретация частотных компонент требует дальнейшего анализа с привлечением биохимических исследований. Развитие данного подхода может стать основой для новых стратегий диагностики и терапии связанных с нарушением клеточных функций заболеваний, таких как рак или нейродегенеративные патологии.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Алексеенко С.Н., Татевосян А.С., Бунякин А.В. и др. Физиологические функциональные состояния митохондрии в термодинамическом и электрохимическом цикле // Кубанский научный медицинский вестник. 2018. Т. 25, № 5. С. 123–135. DOI:10.25207/1608-6228-2018-25-5-123-135.
2. Кандурова К.Ю., Сумин Д.С., Мамошин А.В. и др. Спектральный состав флуоресценции печени у пациентов с механической желтухой // Современные методы исследования в клеточной биологии и медицине: сборник трудов Всероссийской конференции, г. Орел, 16–17 ноября 2023 г. Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. С. 41.
3. Kandurova K.Y., Sumin D.S., Mamoshin A.V., et al. Deconvolution of the fluorescence spectra measured through a needle probe to assess the functional state of the liver // *Lasers in Surgery and Medicine*. 2023. Vol. 55. No. 7. P. 690–701. DOI:10.1002/lsm.23695.
4. Казакова Т.А., Новиков С.М., Левин Г.Г. и др. Исследование состояния цитоплазмы нейрона методом динамической фазовой микроскопии // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. 2014. № 4. С. 25–31.
5. Тычинский В.П. Динамическая фазовая микроскопия: возможен ли «диалог» с клеткой? // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 5. С. 535–552. DOI:10.3367/UFNr.0177.200705c.0535.
6. Охрименко А.А. Практическое применение метода фазосдвигающей интерферометрии для измерения физических характеристик клеток // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68, № 2. С. 53–60. DOI:10.30533/GiA-2024-017.
7. Veloso T.M., de Souza da Fonseca A., Costa dos Santos G. Effects of light-emitting diodes on cell biology // *Frontiers in Photonics*. 2022. Iss. 3. P. 1018773. DOI:10.3389/fphot.2022.1018773.
8. Octors C., Yeast R.E., Emrich S.M., et al. Calcium oscillations in HEK293 cells lacking SOCE suggest the existence of a balanced regulation of IP3 // *Frontiers in Systems Biology*. 2024. Vol. 4. P. 1343006. DOI:10.3389/fsysb.2024.1343006.
9. Патрушев М.В., Мазунин И.О., Виноградова Е.Н. и др. Слияние и деление митохондрий // Биохимия. 2015. Т. 80, № 11. С. 1673–1682.

10. Albuquerque-Pontes G.M., Vieira R. de P., Tomazoni S.S., et al. Effect of pre-irradiation with different doses, wavelengths, and application intervals of low-level laser therapy on cytochrome c oxidase activity in intact skeletal muscle of rats // *Lasers in Medical Science*. 2015. Vol. 30. Iss. 1. P. 59–66. DOI:10.1007/s10103-014-1616-2.
11. Wu S., Zhou F., Wei Y., et al. Cancer phototherapy via selective photoinactivation of respiratory chain oxidase to trigger a fatal superoxide anion burst // *Antioxidants & Redox Signaling*. 2014. Vol. 20. Iss. 5. P. 733–746. DOI:10.1089/ars.2013.522.

**АВТОРЫ Охрименко Александр Андреевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

**Кретушев Александр Викторович**

ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», Москва, Россия  
кафедра оптико-электронных приборов и систем, Институт перспективных технологий и промышленного программирования  
канд. техн. наук

**Поступила 28.02.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликована 29.08.2025.**



# Application of the dynamic phase interferometry method to study the dynamic processes of biological objects

Alexander A. Okhrimenko<sup>1</sup>✉, Alexander V. Kretushev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

✉ zloyuzi@yandex.ru

**CITATION** Okhrimenko AA, Kretushev AV. Application of the dynamic phase interferometry method to study the dynamic processes of biological objects. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 123–132. DOI:10.30533/GiA-2025-032.

**KEYWORDS** dynamic phase microscopy, cellular processes, frequency analysis, phase portrait, interference analysis, photostimulation, fast Fourier transform, LED

**ABSTRACT** The paper presents the results of a study of dynamic processes in living buccal epithelial cells using dynamic phase microscopy (DPM). The experimental setup, created on the basis of a modified MII-4 microinterferometer, provided real-time registration of nanometer-scale changes in the phase height of cellular structures. The high spatial and temporal resolution of the technique made it possible to observe intracellular processes without the use of fluorescent labels and invasive interventions. Algorithms for constructing track diagrams, spatiotemporal and spatiotemporal portraits, providing detailed visualization of local cellular activity, have been developed for data analysis. Testing of the system on a semiconductor wafer showed high stability of the instrument (mistake  $\pm 5$  nm), confirming the reliability of measurements. The study of cells revealed the presence of unsteady processes with an amplitude of up to 6–8 nm, mainly localized in the transition region between the nucleus and the cytoplasm. Spatial frequency analysis revealed the predominance of components in the 0.01–0.07 and 0.16–0.245 Hz ranges, which is presumably related to mitochondrial activity, Brownian motion, protein synthesis, and the effects of photobiomodulation of cytochrome c oxidase when exposed to infrared radiation. The presented results demonstrate the potential of DPM for noninvasive monitoring of intracellular dynamics and emphasize the need for further research to establish accurate correlations between spectral characteristics and specific biological processes.

- REFERENCES**
1. Alekseenko SN, Tatevosjan AS, Bunjakin AV, et al. Fiziologicheskie funktsionalnye sostojanija mitohondrii v termodinamicheskom i elektrohimicheskom tsikle [Physiological functional states of mitochondria in the thermodynamic and electrochemical cycle]. *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2018;25(5): 123–135. (In Russian). DOI:10.25207/1608-6228-2018-25-5-123-135.
  2. Kandurova KY, Sumin DS, Mamoshin AV, et al. Spektralnyj sostav fluorestsentsii pečeni u patsientov s mehanicheskoj zheltuhoj [Spectral composition of liver fluorescence in patients with obstructive jaundice]. *Proceedings of the All-Russian conference “Modern research methods in cell biology and medicine”, Orel, November 16–17, 2023*. Orel: OSU named after I.S. Turgenev; 2023: 41 (In Russian).
  3. Kandurova KY, Sumin DS, Mamoshin AV, et al. Deconvolution of the fluorescence spectra measured through a needle probe to assess the functional state of the liver. *Lasers in Surgery and Medicine*. 2023;55(7): 690–701. DOI:10.1002/lsm.23695.
  4. Kazakova TA, Novikov SM, Levin GG, et al. Issledovanie sostojanija citoplazmy nejrona metodom dinamicheskoj fazovoj mikroskopii [Investigation of the state of the cytoplasm of a neuron by dynamic phase microscopy]. *Bulletin of the Moscow University. Series 16: Biology*. 2014;4: 25–31. (In Russian).
  5. Tychinsky VP. Dinamicheskaja fazovaja mikroskopija: vozmožen li “dialog” s kletkoj? [Dynamic phase microscopy: is a “dialogue” with a cell possible?]. *Successes of Physical Sciences*. 2007;177(5): 535–552. (In Russian). DOI:10.3367/UFNr.0177.200705c.0535.
  6. Okhrimenko AA. Praktičeskoe primenenie metoda fazosdvigajuwej interferometrii dlja izmerenija fizičeskikh harakteristik kletok [Practical application of the phase-shifting interferometry method for measuring the physical characteristics of cells]. *Izvestia vuzov “Geodesy and Aerophotosurveying”*. 2024;68(2): 53–60. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-017.
  7. Veloso TM, de Souza da Fonseca A, Costa dos Santos G. Effects of light-emitting diodes on cell biology. *Frontiers in Photonics*. 2022;3: 1018773. DOI:10.3389/fphot.2022.1018773.
  8. Octors C, Yoast RE, Emrich SM, et al. Calcium oscillations in HEK293 cells lacking SOCE suggest the existence of a balanced regulation of IP3. *Frontiers in Systems Biology*. 2024;4: 1343006. DOI:10.3389/fsysb.2024.1343006.
  9. Patrushev MV, Mazunin IO, Vinogradova PA, et al. Slijanie i delenie mitohondrii [Fusion and division of mitochondria]. *Biochemistry*. 2015;80(11): 1673–1682. (In Russian).
  10. Albuquerque-Pontes GM, Vieira RP, Tomazoni SS, et al. Effect of pre-irradiation with different doses, wavelengths, and application intervals of low-level laser therapy on cytochrome c oxidase activity in intact skeletal muscle of rats. *Lasers in Medical Science*. 2015;30(1): 59–66. DOI:10.1007/s10103-014-1616-2.
  11. Wu S, Zhou F, Wei Y, et al. Cancer phototherapy via selective photoinactivation of respiratory chain oxidase to trigger a fatal superoxide anion burst. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2014;20(5): 733–746. DOI:10.1089/ars.2013.522.

**AUTHORS Alexander A. Okhrimenko**

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

**Alexander V. Kretushev**

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia  
Department of Optoelectronic Devices and Systems, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming  
PhD in Engineering

Submitted: February 28, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.