

ISSN 0536-101X
e-ISSN 2618-7299

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ГЕОДЕЗИЯ
И АЭРОФОТОСЪЕМКА

Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying

69 • 02 • 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 • 02 • 2025

Москва, Россия

Moscow, Russia

О журнале

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

About the Journal

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

Редакционная коллегия

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

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

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

Подписано в печать 30.04.2025.
Гарнитура Source Serif Pro.
Формат 60×90^{1/8}.
Бумага мелованная.
Печать цифровая.
Объем 18,5 усл. печ. л.
Тираж 500 экз.
Заказ № 8. Цена договорная.

Редакция
Служба редакционно-
издательской деятельности
и наукометрии

Отпечатано в типографии
ООО «ПринтСайдАп»
printside.ru

Editorial Board

EDITOR-IN-CHIEF Viktor P. Savinykh

RAS Academician, Professor,
Doctor of Engineering; Russia

**DEPUTY
EDITOR-IN-CHIEF** Vitaliy V. Bratkov

Dr. of Sci. (Geography); Russia

**MEMBERS
OF THE EDITORIAL
BOARD**

Andrey V. Belotserkovskiy

Professor, Dr. of Sci. (Phys.-Math); Russia

Valeriy G. Bondur

RAS Academician, Professor, Dr. of Engineering; Russia

Alexander G. Chibunichev

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Oleg V. Denisenko

Doctor of Engineering; Russia

Ibragim G. Gairabekov

Doctor of Engineering; Russia

Slaveyko Gospodinov

Professor, Dr. of Sci. (Geodesy); Bulgaria

Alexei D. Gvishiani

RAS Academician, Dr. of Sci. (Phys.-Math), Russia

Petr Holota

Doctor of Engineering; Czech Republic

Wolfgang Kresse

Professor, Doctor of Engineering; Germany

Vasilij A. Malinnikov

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Elena M. Mazurova

Doctor of Engineering; Russia

Sergey S. Nekhin

Doctor of Engineering; Russia

Viktor B. Nepoklonov

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Yuri M. Neyman

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Jürgen Oberst

Professor, Doctor of Engineering; Germany

José Joaquín Vila-Ortega

PhD in Engineering; Colombia

Yuri I. Pimshin

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Yuri G. Raizman

PhD in Engineering; Russia

Harald Schuh

Professor, Doctor of Engineering; Germany

Alexander P. Sizov

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Georgy A. Ustavich

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Tamara V. Vereshchaka

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Stanislav N. Yashkin

Professor, Doctor of Engineering; Russia

Igor G. Zhurkin

Professor, Doctor of Engineering; Russia

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

Project Management by:
Nina V. Fomina
Edited by:
Mariya V. Shishkina
Illustrations by:
Ekaterina D. Zhuravlyova
Layout design by:
Svetlana V. Ledneva

Published on 30.04.2025.
Font Source Serif Pro.
Format 60×90¹/₈.
Coated paper.
Digital print.
18.5 printed sheet.
500 copies. Order No. 8.

Editorial Office
Department of Editorial
and Publishing Activities
and Scientometrics

Printed by PrintSide
printside.ru

ГЕОДЕЗИЯ	Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д.	8
	Краткосрочное прогнозирование вертикального полного электронного содержания ионосферы с применением локальной модели и технологии машинного обучения	
АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ	Щеглов М.А., Карелов А.И., Павловский А.А.	23
	Методика сбора и анализа разнородной геоинформации для решения задач строительного контроля на объектах строительства железных дорог	
	Чернышев В.Е.	35
	Геометрическая калибровка цифровых фотокамер с длиннофокусным объективом по серии снимков с общим центром проекции	
ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ	Абдульмянов С.Н., Михайлов Н.Н.	46
	Криогенные формы рельефа массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай)	
	Пошивайло Я.Г.	69
	Структурно-функциональный аппарат цифровой карты	
ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ	Айнуллина К.Н., Богданова О.В.	82
	Оценка устойчивого развития земель урбанизированных территорий на примере городского округа город Тюмень	
	Мелкий В.А., Верхотуров А.А.	93
	Определение дешифровочных признаков проявлений эффузивной вулканической деятельности для выявления ее воздействия на территории	
	Тарарин А.М., Сейтвелиева А.С.	108
	Анализ лучших мировых практик развития 3D-кадастра с использованием цифровых информационных моделей и их имплементации в России	
	Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Барышева А.М., Коломыцев А.А., Довгаль В.В.	124
	Выбор оптимальной методики идентификации угодий на землях сельскохозяйственного назначения с использованием нейронных сетей	
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ	Осипов Е.В.	139
	Исследование метода сборки и юстировки компонентов оптических полюсов каналов оптоволоконной связи	

GEODESY	Kupriyanov A.O., Morozov D.A., Zamogilny D.	8
	Short-term prediction of the vertical total electronic content of the ionosphere using a local model and machine learning technology	
EARTH AEROSPACE SURVEY, PHOTOGRAMMETRY	Scheglov M.A., Karelov A.I., Pavlovsky A.A.	23
	The methodology of collecting and analyzing heterogeneous geoinformation for solving problems of construction control at railway construction sites	
	Chernyshev V.E.	35
	Geometric calibration of digital cameras with long focal length lenses using a series of images with a common center of projection	
GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY	Abdulmyanov S.N., Mikhailov N.N.	46
	Cryogenic landforms of the Tsengel Khairkhan uul, Mongolian Altai	
	Poshivaylo Ya.G.	69
	Structural and functional composition of a digital map	
LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING	Ainullina K.N., Bogdanova O.V.	82
	Assessment of sustainable land development in urbanized areas: a case study of the Tyumen urban district	
	Melkiy V.A., Verkhoturov A.A.	93
	Identification of decoding signs of effusive volcanic activity manifestations for identifying its impact on the territory	
	Tararin A.M., Seytvelieva A.S.	108
	Analysis of the world's best practices for developing a 3D cadastre using BIM models and their implementation in Russia	
	Gura D.A., Dyachenko R.A., Barysheva A.M., Kolomytsev A.A., Dovgal V.V.	124
	Selection of the optimal method for identifying agricultural land using neural networks	
OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS	Osipov E.V.	139
	Study of the assembly and alignment method of optical pole components of fiber optic communication channels	



Краткосрочное прогнозирование вертикального полного электронного содержания ионосферы с применением локальной модели и технологии машинного обучения

А.О. Куприянов¹✉, Д.А. Морозов¹, Д. Замогильный¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

✉ gns@miigaik.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д. Краткосрочное прогнозирование вертикального полного электронного содержания ионосферы с применением локальной модели и технологии машинного обучения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 8–22. DOI:10.30533/GiA-2025-010.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА машинное обучение, спутниковая геодезическая аппаратура, глобальная навигационная спутниковая система, мониторинг параметров ионосферы, прогнозирование ионосферы, локальная модель ионосферы

АННОТАЦИЯ В работе представлены результаты экспериментальной апробации, основанной на методе машинного обучения технологии краткосрочного прогнозирования параметров ионосферы. Рассмотрены вопросы обучения модели и сбора банка данных для обучения, прогнозирования параметров ионосферы по данным глобальных ионосферных карт и локальной модели ионосферы. Приведены сведения о программном обеспечении, используемом для мониторинга и краткосрочного прогнозирования параметров ионосферы, в том числе для машинного обучения. Произведена оценка точности результатов, полученных в ходе экспериментальной апробации технологии прогнозирования параметров ионосферы. Для выбранной локальной области: 1) создана основанная на машинном обучении локальная модель краткосрочного прогнозирования параметров ионосферы; 2) выполнено моделирование параметров ионосферы в локальной области по наблюдениям глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) на станциях сети Международной ГНСС-службы (*англ.* International GNSS Service, IGS); 3) произведена оценка точности краткосрочного прогнозирования ионосферы при использовании входных данных из локального моделирования и из глобальной модели ионосферы. Установлено, что модель краткосрочного прогнозирования параметров ионосферы, обученная по данным глобальных ионосферных карт, способна функционировать

по данным локального моделирования ионосферы, при этом среднеквадратическая погрешность прогноза увеличивается на 0,468 TECU. Это обеспечивает в два раза и более высокую точность, чем при использовании физических моделей ионосферы, таких как IRI-2016.

1 Введение

Зачастую для решения задач в области геодезии, навигации, радиолокации и организации радиосвязи необходимо знать параметры ионосферы на заданный момент времени в будущем. К таким задачам относятся планирование и производство геодезических работ с применением спутниковой геодезической аппаратуры, разработка систем широкозонной дифференциальной коррекции, обеспечение позиционирования и навигации по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [1], радиосвязи [2, 3], радиолокации и изучение космической погоды [4, 5]. Для решения подобных задач используются физические модели ионосферы, такие как IRI-2016 / IRI-2020 [6] и NeQuick [7]. Эти модели позволяют получать параметры ионосферы на заданный момент времени по ограниченному набору входных параметров. В качестве таких параметров может использоваться число Вольфа (R), поток радиоизлучения на волне 10,7 см ($F 10.7$), ионосферный индекс солнечной активности (IG12). Недостатком данного подхода является относительно низкая точность определения искомых параметров. В качестве альтернативного метода решения данной задачи нами разработана технология краткосрочного прогнозирования распределения вертикального полного электронного содержания в ионосфере. Технология включает в себя систему локального мониторинга вертикального полного электронного содержания (*англ.* Vertical Total Electronic Content, VTEC) по измерениям ГНСС и модель для краткосрочного прогнозирования ионосферы, созданную при помощи метода машинного обучения [8, 9]. Метод машинного обучения в последние годы нашел широкое применение при решении задач ионосферного мониторинга и применяется для исследования ионосферных возмущений в полярных и экваториальных областях [10–12], изучения связей между ионосферными возмущениями и литосферными процессами и для прогнозирования параметров ионосферы [13, 14].

Глобальные ионосферные карты (*англ.* Global Ionospheric Maps, GIM) предоставляют большую базу данных для машинного обучения, но не могут быть получены в реальном времени. Вследствие этого входными данными для обученной модели могут послужить параметры ионосферы, полученные путем ее локального мониторинга по наблюдениям на одной или нескольких постоянно действующих станциях наблюдений ГНСС. Эти модели имеют разные временное и пространственное разрешение, точность и другие параметры. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько корректно будет работать модель краткосрочного прогнозирования ионосферы обучения на данных GIM, использующая при этом входные параметры, полученные методом локального мониторинга.

Цель предлагаемого исследования — установление возможности применения модели краткосрочного прогнозирования ионосферы, обученной на данных GIM с применением входных параметров из локальной модели ионосферы, и оценка точности прогнозирования. Данное исследование актуально в связи с тем, что краткосрочное прогнозирование ионосферы является актуальной задачей в ряде областей, а предложенный подход к ее решению может позволить повысить точность получаемого прогноза по сравнению с применением физических моделей ионосферы. Целевыми параметрами модели являются обеспечение существенно меньших погрешностей прогнозирования VTEC, чем при использовании физических моделей ионосферы, и возможность организации ее работы в режиме реального времени. Для сравнения будет использоваться модель IRI-2016.

Разработанная модель позволяет, используя текущее значение VTEC в заданной точке, вычислить значение VTEC через заданный промежуток времени. При этом система локального мониторинга ионосферы используется с целью получения входных данных для модели. Принципиальная схема работы технологии краткосрочного прогнозирования VTEC следующая:

1. В режиме реального времени по мультисистемным, мультисистемным наблюдениям ГНСС с одной или нескольких дифференциальных геодезических станций выполняется моделирование VTEC в локальной области для момента времени t .
2. Для заданной точки (или точек) в рамках локальной области составляются наборы входных данных для прогнозирования. Значение VTEC определяется на момент времени t , а остальные параметры на момент $t + dt$, где dt – период прогнозирования.
3. Полученные наборы входных данных передаются в обученную модель, и производится вычисление значений VTEC в выбранных точках для момента времени $t + dt$.


2 Материалы и методы

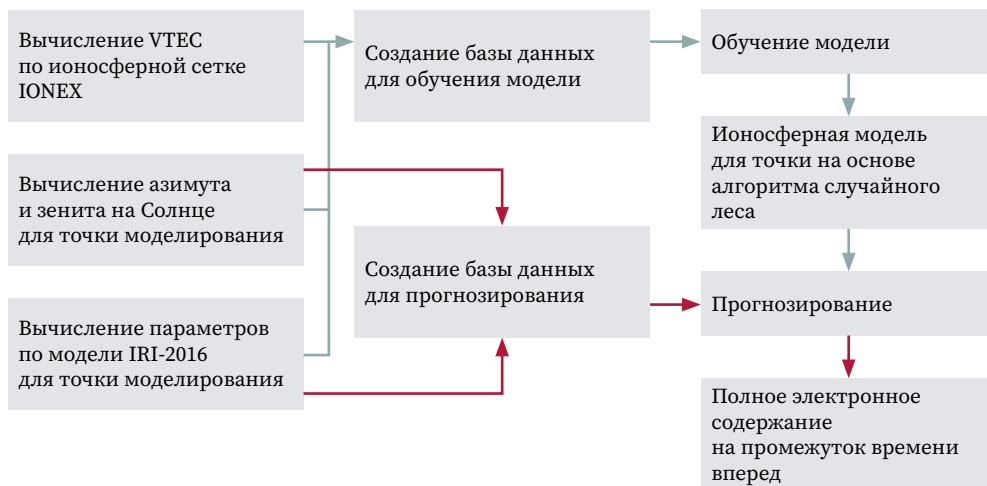
2.1 Модель для краткосрочного прогнозирования ионосферы

Для создания модели краткосрочного прогнозирования VTEC использована технология машинного обучения, а именно алгоритм случайного леса. Этот алгоритм выбран в силу следующих его возможностей, полезных в рамках решаемой задачи:

- 1) использование разнородных данных без необходимости их масштабирования и преобразования;
- 2) оценка значимости отдельных параметров для выбора лучшего набора данных для обучения модели;
- 3) использование при обучении больших объемов данных.

Принципиальная схема создания модели прогнозирования ионосферы на основе алгоритма случайного леса представлена на рис. 1. Голубыми стрелками показан порядок действий для обучения модели на основе базы данных параметров обучения. Красным цветом представлен порядок действий для прогнозирования на основе обученной модели и базы данных параметров обучения.

Рис. 1  Алгоритм создания ионосферной модели и прогнозирования по обученной модели
Fig. 1 An algorithm for creating an ionospheric model and forecasting using the trained model



Для обучения модели создан набор данных в форме временных рядов параметров продолжительностью в 11 лет и дискретностью в 15 минут, всего для каждого параметра используется 385 632 значения. Выбранный период начинается 1 января 2009 года и заканчивается 31 декабря 2019 года, что примерно соответствует последнему полному циклу солнечной активности. При обучении модели в выбранной локальной области задаются одна или несколько точек, для каждой из которых составляются временные ряды входных данных.

Использовались следующие источники и методы получения параметров для обучения модели прогнозирования ионосферы:

- геодезические координаты точки (задаются для каждой используемой при обучении точки);
- время по шкале UTC и местное время;
- фаза 11-летнего цикла солнечной активности;
- азимут и угол возвышения Солнца (вычисляются аналитически [15]);
- критическая частота слоя $F2$ и слоя E , электронная плотность слоев $F2$ и E , высота максимума слоя $F2$ (вычисляются по модели IRI-2016);
- VTEC и его градиенты на момент времени t , VTEC на момент времени $t + dt$ (интерполируются по глобальной ионосферной карте в формате IONEX).

Набор параметров выбирался с помощью метода оценки важности признаков, который работает на основе оценки случайностей в узлах деревьев решений. Посредством метода оценки важности был исключен ряд параметров для улучшения производительности, например индекс авроральной электроструи AE .

Обученная модель представляет собой файл, хранящий составленные деревья условий. Прогнозирование VTEC выполняется по этому набору деревьев условий и входным параметрам. Для обучения модели краткосрочного прогнозирования параметров ионосферы использовалось программное обеспечение собственной разработки, написанное на языке программирования Python с применением свободно распространяемых библиотек Scikit, Pandas, NumPy. При вызове программы ей передается набор параметров для прогнозирования на момент времени t . Выполнив расчеты, программа возвращает вычисленное значение VTEC на момент времени $t + dt$. Вывод и визуализация полученных значений производятся через программное обеспечение локального мониторинга ионосферы, которое рассмотрим далее.

2.2 Система локального мониторинга ионосферы

Система локального мониторинга ионосферы предназначена для создания локальных моделей распределения VTEC по мультисистемным, мультичастотным наблюдениям ГНСС на одной или нескольких дифференциальных геодезических станциях. Система включает в себя программное обеспечение мониторинга ионосферы IMI собственной разработки, аппаратное обеспечение, на котором оно исполняется, и источники данных (спутниковая геодезическая аппаратура или записанный с ее помощью файл наблюдений). Программное обеспечение разработано на языке программирования C++ с применением фреймворка QT.

Получение необходимой измерительной информации возможно следующими способами:

- через один или несколько последовательных портов (при этом данные могут поступать как с физического последовательного порта, к которому подключена спутниковая геодезическая аппаратура [СГА], так и с эмулированного, используемого для передачи данных от удаленной СГА через Интернет);
- из файлов наблюдений и навигационных файлов в формате RINEX (при этом обработка происходит точно так же, как при получении данных в реальном времени от СГА; результаты измерений по отдельным эпохам последовательно передаются и обрабатываются без учета будущих эпох).

Для проведения экспериментальной апробации моделирование производилось по данным из файлов наблюдений на станциях IGS за выбранный период времени.

IMI позволяет производить моделирование распределения VTEC в режиме, близком к реальному времени, используя мультисигментные кодовые и фазовые измерения псевдодалейностей. Для вычисления TEC по направлению на конкретный спутник ГНСС используется зависимость ионосферной задержки от частоты радионавигационного сигнала. Благодаря этому, имея измерения псевдодалейностей по двум сигналам одного спутника TEC и используя следующие формулы^{1,2} [16], получим:

1 ➤
$$TEC_p = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2 [P_{A,L2}^q - P_{A,L1}^q + DCB_{A,L1-L2} + DCB_{L1-L2}^q]}{40,308(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)},$$

где TEC_p — величина полного электронного содержания, вычисленная по кодовым псевдодалейностям;

f_{L1} — несущая частота сигнала $L1$;

f_{L2} — несущая частота сигнала $L2$;

$P_{A,L2}^q$ — кодовая псевдодалейность, измеренная на станции A по сигналу $L2$ спутника q ;

$P_{A,L1}^q$ — кодовая псевдодалейность, измеренная на станции A по сигналу $L1$ спутника q ;

$DCB_{A,L1-L2}$ — межканальная задержка приемника, установленного на станции A для сигналов $L1$ и $L2$;

DCB_{L1-L2}^q — межканальная задержка спутника q для сигналов $L1$ и $L2$;

2 ➤
$$TEC_\Phi = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2 [\Phi_{A,L2}^q - \Phi_{A,L1}^q + DCB_{A,L1-L2} + DCB_{L1-L2}^q]}{40,308(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)},$$

где TEC_Φ — величина полного электронного содержания, вычисленная по фазовым псевдодалейностям;

$\Phi_{A,L2}^q$ — фазовая псевдодалейность, измеренная на станции A по сигналу $L2$ спутника q ;

$\Phi_{A,L1}^q$ — фазовая псевдодалейность, измеренная на станции A по сигналу $L1$ спутника q .

У значений TEC_p большие случайные погрешности, но нет существенных систематических погрешностей при условии использования точных значений межканальных задержек. У значений TEC_Φ малые случайные погрешности, но есть существенная систематическая погрешность, обусловленная неточностью разрешения фазовой неоднозначности. Для получения итоговых TEC используются значения TEC_Φ с целью определения непосредственно изменений величины со временем и значения TEC_p для устранения систематического сдвига.

Далее необходимо произвести переход от TEC по направлению на спутник к VTEC. Для этого вычисляются точка пересечения сигналом ионосферы P_1 и функция отображения ионосферы F .

В программном обеспечении IMI в качестве однослойной модели ионосферы используется эллипсоид со следующими параметрами: большая полуось — 6 678 137,000 м, малая полуось — 6 656 752,314 м. Такой тонкий слой находится примерно на высоте 300 км над поверхностью Земли. Точка пересечения ионосферы представляет собой точку, в которой пересекаются отрезок «спутник — приемник» и эллипсоид.

Функция отображения ионосферы предназначена для перехода от TEC по направлению на спутник к VTEC в точке пересечения ионосферы. Вычисление VTEC выполняется следующим образом:

1 Wild U. Ionosphere and geodetic satellite systems, permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. 1994. No. 48. P. 155.
2 Guochang Xu, Yan Xu. GPS: Theory, Algorithms and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 340.

3 >

$$VTEC = TEC \cdot F,$$

где F — значение функции отображения ионосферы.

В ИМІ используется эллипсоидальная функция отображения. Для вычисления F применяется следующая формула³:

4 >

$$F = \frac{R_{P_{PI}} - 50}{H} \cos Z + \frac{\sqrt{(R_{P_I} + 50 + H^2) - (r + 50)^2 \sin^2 Z}}{H},$$

где $R_{P_{PI}}$ — длина радиус-вектора подыоносферной точки;

H — принятая высота верхней границы ионосферы, км;

Z — зенитный угол направления «приемник — спутник»;

R_{P_I} — длина радиус-вектора точки пересечения ионосферы.

После того как выполнено вычисление всех значений VTEC для одной эпохи наблюдений, составляется локальная модель ионосферы для данной эпохи. Параметры локальной модели ионосферы представляют собой коэффициенты разложения в ряд Тейлора. Оценка параметров модели выполняется по методу наименьших квадратов параметрическим способом. Параметрическое уравнение связи имеет следующий вид⁴:

5 >

$$VTEC(B, L) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm} (B - B_0)^n (L - L_0)^m,$$

где B — геодезическая широта точки пересечения ионосферы;

L — геодезическая долгота точки пересечения ионосферы;

n_{max} — степень разложения по широте;

m_{max} — степень разложения по долготе;

E_{nm} — коэффициенты разложения в ряд Тейлора;

B_0 — геодезическая широта начальной точки P_0 (центральная точка локальной модели ионосферы);

L_0 — геодезическая долгота начальной точки P_0 .

В качестве измеренных величин используются все имеющиеся значения VTEC на рассматриваемую эпоху. По результатам уравнивания вычисляются значения коэффициентов и их средняя квадратическая погрешность (СКП). Вычисление значения VTEC для производной точки при помощи оцененных параметров выполняется непосредственно по формуле (5). Полученную модель можно либо применять для вычисления VTEC, либо преобразовать в сеточную модель (набор значений VTEC, заданных в узлах регулярной сетки). Параметры локальной модели ионосферы оцениваются для каждой эпохи наблюдений. Полученные параметры используются при вычислении VTEC для заданной точки в пределах локальной модели.

2.3 Экспериментальная апробация технологии


Целями экспериментальной апробации технологии являются проверка ее надежности по работе с реальным набором входных данных, поиск возможных неисправностей и оценка точности результатов прогнозирования.

Для экспериментальной апробации технологии выбрана область от 50,173° до 54,173° с. ш. и от 3,818° до 7,818° в. д. Полученная локальная область представлена на рис. 2. Данная область выбрана за счет наличия внутри нее и в непосредственной близости от нее шести станций Международной ГНСС-службы (англ. International GNSS Service, IGS) (REDU, BRUX, TIT2, DLF1, KOS1, WSRT), оснащенных современными СГА (Septentrio PolaRx5TR, PolaRx5e и PolaRx5, Javad Delta, Trimble Alloy) и предоставляющих мультисистемные, мультичастотные наблюдения ГНСС, необходимые для обеспечения оптимального качества

3 Guochang Xu, Yan Xu. GPS: Theory, Algorithms and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 340.

4 Wild U. Ionosphere and geodetic satellite systems, permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. 1994. No. 48. P. 155.

локального мониторинга ионосферы. Кроме того, данная область находится в средних широтах, не характеризуется тектонической и вулканической активностью или наличием техногенных источников ионизации. Это позволяет сделать предположение о слабом уровне возмущенности ионосферы, что является важным фактором для первого этапа экспериментальной апробации разработанной технологии. Непосредственно обучение модели краткосрочного прогнозирования ионосферы выполнялось для точки, соответствующей положению станции KOS1.


Рис. 2  Локальная область, выбранная для экспериментальной апробации
Fig. 2 Selected local area for experimental testing

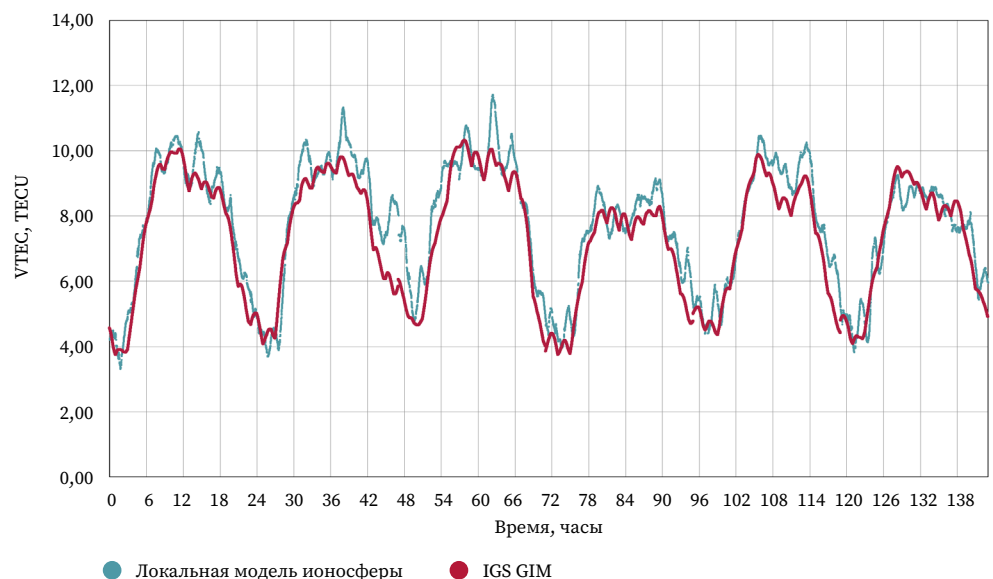


В рамках экспериментальной апробации использовались входные данные для прогнозирования значения VTEC и его градиентов с дискретностью 30 секунд, полученные из двух источников:

- 1) глобальных ионосферных карт IGS в формате IONEX (далее — IGS GIM);
- 2) локальной модели ионосферы для выбранной области; локальная модель создана при помощи программного обеспечения IMI с дискретностью в 30 секунд и сохранена в виде файлов в формате IONEX (далее — локальная модель); локальная модель построена по наблюдениям ГНСС на станциях REDU, BRUX, TIT2, DLF1, KOS1, WSRT.

На рис. 3 приведены графики зависимости VTEC для рассматриваемых источников данных. Локальная модель отражает меньшие по продолжительности вариации VTEC, чем IGS GIM, но при этом является в целом менее гладкой.

Рис. 3  Значения VTEC, полученные по IGS GIM и локальной модели ионосферы, для исследуемого периода времени
Fig. 3 Obtained VTEC values from IGS GIM and the local ionosphere model for the time period under study



По каждому набору входных данных выполнено прогнозирование VTEC на один час вперед. Прогнозирование выполнялось для станции KOS1 на период продолжительностью шесть суток. Остальные данные, необходимые для функционирования модели прогнозирования ионосферы, также рассчитаны с дискретностью в 30 секунд и использовались в обоих случаях.

3 Результаты и обсуждение



В результате экспериментальной апробации технологии получены временные ряды прогнозируемых значений VTEC для двух наборов входных данных. Полученные значения представлены на рис. 4 в виде графиков зависимости VTEC от времени.

По каждому набору входных данных получены результаты прогнозирования для всего рассматриваемого периода. Для первого ряда какие-либо аномалии и выбросы отсутствуют. Для второго ряда имеются существенные (4–8 TECU) единичные положительные аномалии VTEC, примерно соответствующие 5 часам утра по местному времени.

Для обоих полученных рядов прогнозируемого VTEC рассчитаны разности по модулю между исходными и прогнозируемыми значениями. Для IGS GIM разности представлены на рис. 5, а для локальной модели — на рис. 6.

Рис. 4  Результаты прогнозирования VTEC по двум наборам входных данных

Fig. 4 VTEC prediction results for two sets of input data

-  Прогноз по локальной модели
-  IGS GIM

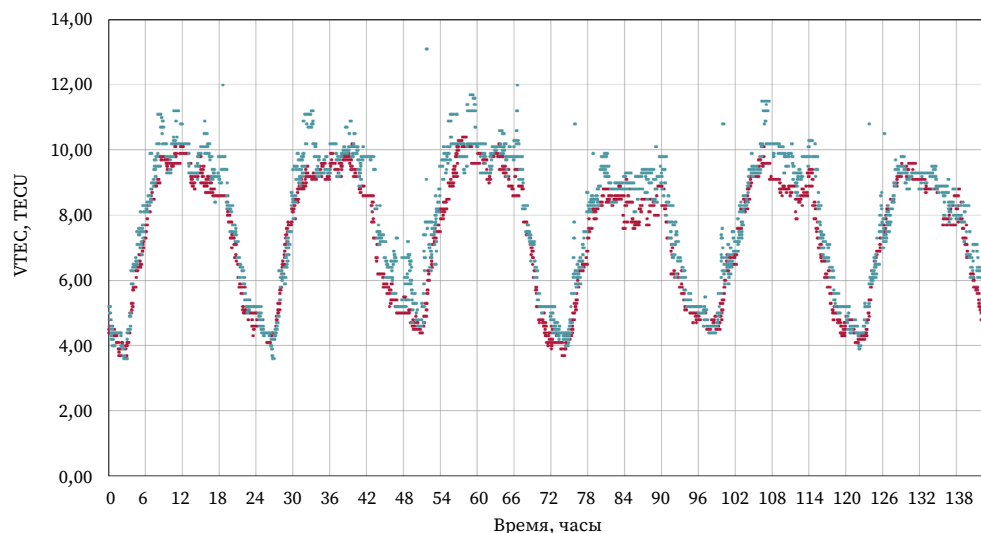


Рис. 5  Разности исходных и прогнозируемых значений VTEC для IGS GIM

Fig. 5 Differences between initial and predicted VTEC values for IGS GIM

-  IGS GIM

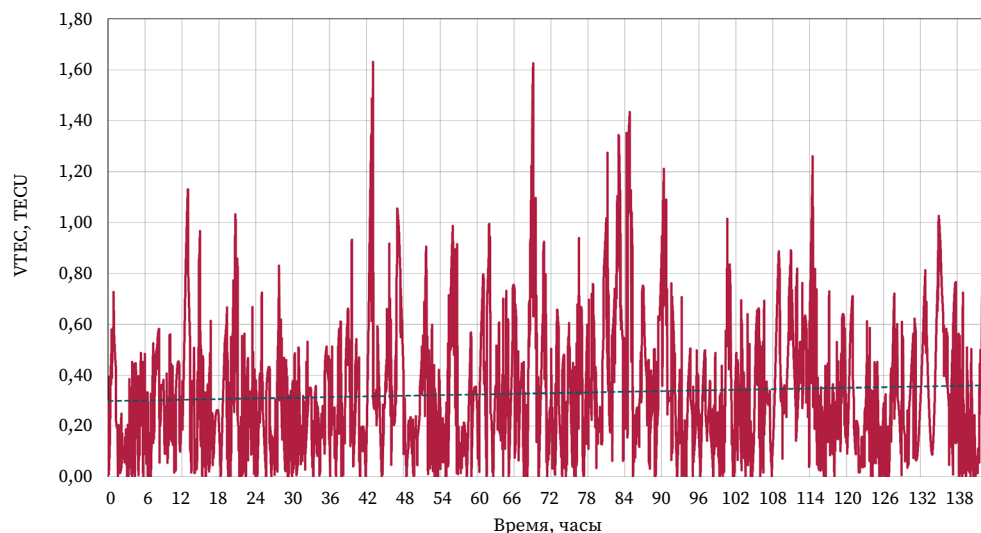
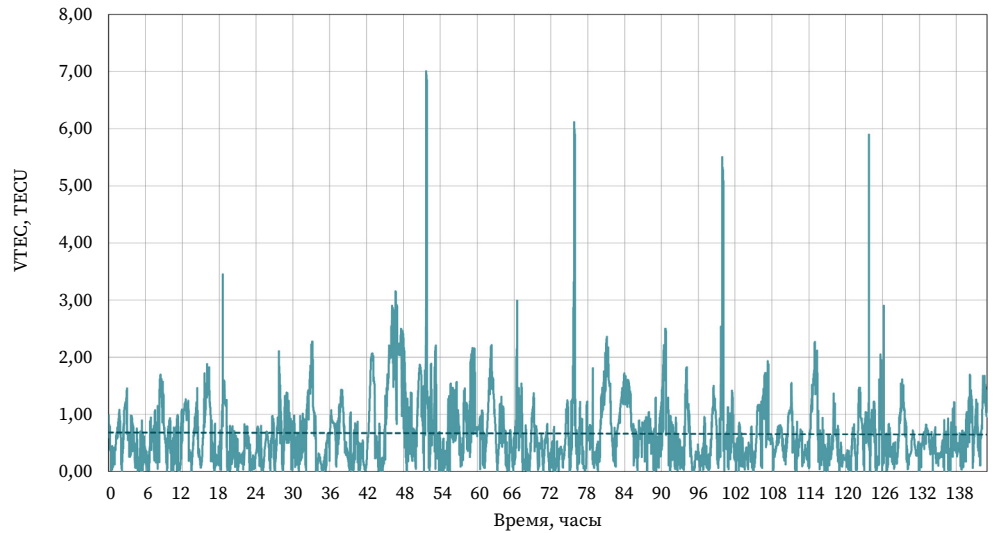


Рис. 6
Разности исходных и прогнозируемых значений VTEC для локальной модели

Fig. 6
Differences between initial and predicted VTEC values for the local model

● Локальная модель



Отклонения прогнозируемых значений в обоих случаях носят случайный характер и не содержат ярко выраженных периодических изменений. Значимых различий в величине погрешностей для разных суток также не наблюдается.

По отклонениям исходных и прогнозируемых значений вычислены оценки точности прогнозирования VTEC (табл. 1). Кроме того, выполним аналогичные вычисления, используя в качестве модели для прогнозирования IRI-2016, а в качестве истинных значений в первом случае GIM, во втором — результаты локального моделирования.

Таблица 1
Оценки точности прогнозирования VTEC

Table 1
VTEC forecasting accuracy estimates

Источник данных для прогнозирования	Средняя квадратическая погрешность VTEC, TECU	Средняя относительная погрешность, %
IGS GIM	0,411	4,767
Локальная модель	0,879	9,107
IRI-2016 (отклонения от GIM)	1,767	24,550
IRI-2016 (отклонения от локальной модели)	2,251	28,230

Как видно из данных табл. 1, применение предложенного подхода позволяет получить результат с СКП в два раза меньше, чем при использовании физической модели, что подтверждает эффективность выбранного подхода для решения рассматриваемой задачи.

4 Выводы

В ходе экспериментального исследования оценена возможность применения модели краткосрочного прогнозирования ионосферы, обученной на данных GIM с применением входных параметров из локальной модели ионосферы, оценены точность прогнозирования и эффективность метода по сравнению с использованием физической модели ионосферы. Проанализировав полученные в ходе экспериментальной апробации результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Созданная модель прогнозирования ионосферы позволила успешно получить значения VTEC на один час вперед как по данным IGS GIM, на которых она обучалась, так и по данным локальной модели ионосферы. Поскольку рассматриваемая локальная модель ионосферы может формироваться в режиме, близком к реальному времени, можно утверждать, что разработанная технология позволяет на практике реализовать краткосрочное прогнозирование параметров ионосферы.

2. Технология машинного обучения, использованная при создании модели прогнозирования параметров ионосферы, способна с достаточной точностью обеспечить моделирование процесса изменения параметров ионосферы на коротком промежутке времени, что подтверждается результатами проведенного экспериментального исследования. Модель также достаточно адаптивна и позволяет использовать входные параметры с более высокой детальностью относительно тех, что использовались при ее обучении.
3. СКП прогнозирования VTEC на период в 1 час по входным данным IGS GIM составляет 0,411 TECU, при использовании входных данных из локальной модели ионосферы СКП прогноза увеличивается на 0,468 TECU (до 0,879 TECU). Если использовать для прогнозирования модель IRI-2016, то СКП составляет 1,767 TECU относительно IGS GIM и 2,251 TECU относительно локальной модели ионосферы. Полученный при помощи разработанной технологии результат прогнозирования в несколько раз точнее, чем результат, который можно получить по физической модели ионосферы.
4. СКП прогнозирования VTEC при использовании входных данных IGS GIM на 53 % меньше, чем при применении данных локальной модели ионосферы. Кроме того, временной ряд прогнозируемых VTEC, полученный по входным данным из локальной модели ионосферы, содержит систематически возникающие вылеты примерно в 5 часов утра по местному времени. Таким образом, глобальная модель ионосферы с низким пространственным и временным разрешением достаточно сильно отличается от локальной модели ионосферы, чтобы используемый для обучения набор данных существенно влиял на результаты прогнозирования. Исходя из этого, для получения оптимального результата при работе в режиме реального времени необходимо добавить в базу дополнительные данные для обучения, в том числе данные локальной модели ионосферы.
5. Погрешности прогнозирования VTEC существенно не зависят от времени суток, не считая отдельных вылетов. В рамках исследуемого периода в 6 суток СКП прогнозирования VTEC на отдельно взятые сутки варьируется в пределах 25 % от СКП за весь рассматриваемый период времени. Минимальное значение суточного СКП составляет 0,70 TECU, а максимальное — 1,08 TECU для прогнозирования по данным локальной модели ионосферы.


Несмотря на то, что в данном исследовании рассматривается только прогнозирование VTEC, данный подход применим для прогнозирования и других параметров ионосферы. В частности, целесообразно в дальнейшем добавить возможность прогнозировать параметры слоя F_2 (критическую частоту и высоту максимума слоя F_2) с использованием в качестве входных данных измерений ионозонда. Кроме того, возможна реализация прогноза параметров ионосферы с помощью прогнозируемых значений VTEC для уточнения индекса ионосферной активности. Для этого применяется физическая модель ионосферы (например, IRI), которая использует один из индексов ионосферной активности в качестве входного параметра. Выполняется прогнозирование VTEC на момент времени $t + dt$. Затем подбирается значение индекса ионосферной активности, при котором совпадают полученное в результате прогноза и вычисленное по модели значения VTEC. Уточненное таким образом значение индекса ионосферной активности используется для вычисления искомым параметров ионосферы (f_oF_2 , hmF_2 и другие поддерживаемые физической моделью) на момент времени $t + dt$. Точность прогнозирования параметров ионосферы таким способом целесообразно проанализировать в рамках дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Смирнов В.М. и др. Прогнозирование параметров ионосферы по данным навигационных спутниковых систем // Научное издание. 2018. Т. 19. № 9. С. 21–28. DOI:10.18127/j19998465-201809-04.

2. Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 4. С. 526–533.
3. Blaunstein N.S., Ben-Shimol Y. Prediction of Operational Parameters of Radio Signals Passing a Land-Satellite Link through StormTime Ionosphere // Information and Control Systems. 2018. Vol. 1. No. 92. P. 85–95. DOI:10.15217/issnl684-8853.2018.1.85.
4. Васенина А.А. Влияние уровня солнечной активности и геомагнитных возмущений на точность прогнозирования критической частоты ионосферы // Техника радиосвязи. 2014. Т. 3. № 23. С. 3–10.
5. Рождественский Д.Б., Телегин В.А., Рождественская В.А. Выделение и прогнозирование высокочастотных составляющих вариаций критической частоты для среднеширотной ионосферы методами спектрального анализа // Physics of Auroral Phenomena. 2018. Т. 41. № 1. С. 139–142. DOI:10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.139-142.
6. Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., et al. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark // Reviews of Geophysics. 2022. Vol. 60. No. 4. P. 1–65. DOI:10.1029/2022RG000792.
7. Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. Vol. 70. No. 15. P. 1856–1862. DOI:10.1016/j.jastp.2008.01.015.
8. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. No. 45. P. 5–32.
9. Замогильный Д. Прогнозирование полного электронного содержания ионосферы на основе алгоритмов машинного обучения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 4. С. 39–46. DOI:10.36724/2409-5419-2022-14-4-39-46.
10. Аппалонов А.М., Масленникова Ю.С. Нейросетевое прогнозирование динамики экваториальной аномалии по данным полного электронного содержания ионосферы // Техника радиосвязи. 2021. Т. 3. № 50. С. 29–42. DOI:10.33286/2075-8693-2021-50-29-42.
11. Серебренникова С.А. Оценка границ локализации возмущений высокоширотной ионосферы по данным GPS/ГЛОНАСС // Physics of Auroral Phenomena. 2021. Т. 44. № 1. С. 150–153. DOI:10.51981/2588-0039.2021.44.035.
12. Жуков А.В., Ясюкевич Ю.В., Серебренникова С.А. Машинное обучение в задаче оценки границы аврорального овала по картам вариаций полного электронного содержания // Распространение радиоволн: труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции: в 2 т. (Казань, 1–6 июля 2019 г.). Казань: КФУ, 2019. Т. 1. С. 397–400.
13. Жуков А.В., Сидоров Д.Н., Мыльникова А.А. и др. Поиск ключевых управляющих параметров для оперативного прогноза полного электронного содержания ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 263–272. DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-3-263-272.
14. Салимов Б.Г., Бернгардт О.И., Хмельнов А.Е. Применение сверточных нейронных сетей для прогнозирования критической частоты f_oF_2 // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. № 1. С. 60–72. DOI:10.12737/szf-91202307.
15. Reda I., Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications // Solar Energy. 2004. Vol. 76. No. 5. P. 577–589.
16. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картгеоцентр, 2005. Т. 1. 334 с.

АВТОРЫ **Куприянов Андрей Олегович**

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

Морозов Дмитрий Андреевич


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

Замогильный Дмитрий

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»

(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет

 0009-0008-3242-1471

Поступила 15.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Short-term prediction of the vertical total electronic content of the ionosphere using a local model and machine learning technology

Andrey O. Kupriyanov¹✉, Dmitry A. Morozov¹, Dmitry Zamogilny¹

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

CITATION Kupriyanov AO, Morozov DA, Zamogilny D. Short-term prediction of the vertical total electronic content of the ionosphere using a local model and machine learning technology. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 8–22. DOI:10.30533/GiA-2025-010.


KEYWORDS machine learning, GNSS Receivers, GNSS, monitoring of ionospheric parameters, ionospheric prediction, local ionospheric model

ABSTRACT The article presents the experimental testing results of the short-term ionospheric parameters forecasting technology based on machine learning. The basis for ionospheric parameters forecasting was data from global ionospheric maps and local ionospheric model. The model training and the formation of a data bank for training issues are considered in the paper. The authors also provide information about the software which was used for monitoring and short-term forecasting of ionospheric parameters (by using machine learning). The accuracy of the results obtained during the experimental testing of the ionospheric parameters forecasting technology is assessed. The technology considered in the article allows to be done for the selected local area: 1) creating a local model of short-term forecasting of ionospheric parameters based on machine learning; 2) modeling ionospheric parameters in a local area based on observations of the global navigation satellite system at IGS stations; 3) assessing the accuracy of short-term forecasting of the ionosphere using the input data of local modeling and the global ionospheric model. The results of the experiments showed that the short-term ionospheric parameter forecast model trained on global ionospheric maps is capable of functioning on the basis of local ionospheric modeling data. Authors noted in the article that the standard deviation of the forecast increases by 0.468 TECU. This provides twice better accuracy as when using physical ionospheric models such as IRI-2016.


REFERENCES 1. Rozhdestvenskiy DB, Rozhdestvenskaya VI, Smirnov VM, et al. Prognozirovaniye parametrov ionosfery po dannym navigacionnyh sputnikovyyh sistem [Prediction

- of ionospheric parameters from satellite navigation systems]. *Science intensive technologies*. 2018;19(9): 21–28. (In Russian). DOI:10.18127/j19998465-201809-04.
2. Krashennnikov IV, Egorov IB, Pavlova NM. Jeftektivnost' prognozirovanija prohozhdenija radiovoln v ionosfere na osnove ionosfernoj modeli IRI-2001 [Effectiveness of predicting radiowave propagation in the ionosphere based on the IRI-2001 ionospheric model]. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008;48(4): 526–533. (In Russian).
 3. Blaunstein NS, Ben-Shimol Y. Prediction of Operational Parameters of Radio Signals Passing a Land-Satellite Link through StormTime Ionosphere. *Information and Control Systems*. 2018;1(92): 85–95. DOI:10.15217/issn1684-8853.2018.1.85.
 4. Vasenina AA. Vlijanie urovnja solnechnoj aktivnosti i geomagnitnyh vozmushhenij na tochnost' prognozirovanija kriticheskoj chastoty ionosfery [Influence of the solar activity level and geomagnetic perturbations on forecast accuracy of the ionospheric critical frequency]. *Radio communication technology*. 2014;3(23): 3–10. (In Russian).
 5. Rozhdestvenskiy DB, Telegin VA, Rozhdestvenskaya VA. Vydelenie i prognozirovanie vysokochastotnyh sostavljajushhih variacij kriticheskoj chastoty dlja sredneshirotnoj ionosfery metodami spektral'nogo analiza [Identification and prediction of high-frequency components of critical frequency variations for the mid-latitude ionosphere by spectral analysis methods]. *Physics of Auroral Phenomena*. 2018;41(1): 139–142. DOI:10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.139-142.
 6. Bilitza D, Pezzopane M, Truhlik V, et al. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. *Reviews of Geophysics*. 2022;60(4): 1–65. DOI:10.1029/2022RG000792.
 7. Nava B, Coisson P, Radicella SM. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2008;70(15): 1856–1862. DOI:10.1016/j.jastp.2008.01.015.
 8. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;45: 5–32.
 9. Zamogilny D. Prognozirovanie polnogo jelektronnogo sodержanija ionosfery na osnove algoritmov mashinnogo obuchenija [Prediction of the total electronic content of the ionosphere based on machine learning algorithms]. *High technologies in Earth space research*. 2022;14(4): 39–46. (In Russian). DOI:10.36724/2409-5419-2022-14-4-39-46.
 10. Appalonov AM, Maslennikova JuS. Nejrosetevoe prognozirovanie dinamiki jekvatorial'noj anomalii po dannym polnogo jelektronnogo sodержanija ionosfery [Neural network-based prediction model for the dynamics of the ionospheric equatorial anomaly using the total electronic content]. *Radio communication technology*. 2021;3(50): 29–42. (In Russian). DOI:10.33286/2075-8693-2021-50-29-42.
 11. Serebrennikova SA. Ocenka granic lokalizacii vozmushhenij vysokoshirotnoj ionosfery po dannym GPS/GLONASS [Estimation of the boundaries of localization of disturbances of the high-latitude ionosphere according to GPS/GLONASS data]. *Physics of Auroral Phenomena*. 2021;44(1): 150–153. (In Russian). DOI:10.51981/2588-0039.2021.44.035.
 12. Zhukov AV, Jasjukevich JuV, Serebrennikova SA. Mashinnoe obuchenie v zadache ocenki granicy avroral'nogo ovala po kartam variacij polnogo jelektronnogo sodержanija [Machine learning in the problem of estimating the boundary of an auroral oval from maps of variations of complete electronic content]. *Radio wave propagation: Proceedings of the XXVI All-Russian Open Scientific Conference*. In 2 vols. Vol. 1 (Kazan, July 1–6, 2019). Kazan: KFU; 2019: 397–400. (In Russian).
 13. Zhukov AV, Sidorov DN, Mylnikova AA, et al. Poisk kljuchevyh upravljajushhih parametrov dlja operativnogo prognoza polnogo jelektronnogo sodержanija ionosfery [Selecting the key control parameters for the ionospheric total electron content nowcasting]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2018;15(3): 263–272. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-3-263-272.
 14. Salimov BG, Bergardt OI, Khmel'nov AE. Primenenie svertochnykh nejronnykh setej dlja prognozirovanija kriticheskoj chastoty f_oF_2 [Application of convolution neural networks for critical frequency f_oF_2 prediction]. *Solar-Terrestrial Physics*. 2023;9(1): 60–72. (In Russian). DOI:10.12737/szf-91202307.
 15. Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*. 2004;76(5): 577–589.
 16. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyh radionavigacionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: Kartgeocentr; 2005. 334 p. (In Russian).


AUTHORS **Andrey O. Kupriyanov**

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

Dmitry A. Morozov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
 0009-0002-1254-9095

Dmitry Zamogilny

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

Submitted: November 15, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Методика сбора и анализа разнородной геоинформации для решения задач строительного контроля на объектах строительства железных дорог

М.А. Щеглов¹✉, А.И. Карелов¹, А.А. Павловский¹

¹ Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия

✉ mihail_sheglov@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Щеглов М.А., Карелов А.И., Павловский А.А. Методика сбора и анализа разнородной геоинформации для решения задач строительного контроля на объектах строительства железных дорог // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 23–34. DOI:10.30533/GiA-2025-011.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА строительный контроль, аэрофотосъемка, беспилотная авиационная система, железная дорога, ортофотоплан, цифровая модель местности, построение поперечного профиля, подсчет объемов земляных работ, фотограмметрия, спутниковые данные, дистанционное зондирование Земли

АННОТАЦИЯ В процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта объектов капитального строительства в соответствии с законодательством Российской Федерации проводится строительный контроль, направленный на проверку соответствия выполняемых работ проектной документации, требованиям технических регламентов, результатам инженерных изысканий, требованиям к строительству, реконструкции объекта капитального строительства. Строительный контроль, выполняемый традиционными методами, сопряжен с существенными трудозатратами при его реализации на крупных площадных или протяженных объектах. В статье описывается опыт применения методов аэрокосмического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), направленных на упрощение задачи инспектора по контролю выполненных работ на объекте строительства и на существенное сокращение объема геодезических работ. Приведены преимущества и недостатки различных методов ДЗЗ, применяемых в ходе строительного контроля. Описаны требования к получаемым беспилотными авиационными системами материалам аэросъемки, необходимым для формирования ортофотопланов, цифровых моделей местности, облаков точек лазерных отражений и др. Описана структура отчета, формируемого на основе комплексного анализа данных ДЗЗ и проектной документации.

Рассматриваются достигнутые применением методики положительные эффекты, а также перспективы использования получаемой информации на объектах, спроектированных с применением технологий информационного моделирования в строительстве.

1 Введение

Строительный контроль проводится в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта объектов капитального строительства в целях проверки соответствия выполняемых работ проектной документации (в том числе решениям и мероприятиям, направленным на обеспечение соблюдения требований энергетической эффективности и оснащенности объекта капитального строительства приборами учета используемых энергетических ресурсов), требованиям технических регламентов, результатам инженерных изысканий, требованиям к строительству, реконструкции объекта капитального строительства, установленным на дату выдачи представленного для получения разрешения на строительство градостроительного плана земельного участка, а также разрешенному использованию земельного участка и ограничениям, установленным в соответствии с земельным и иным законодательством Российской Федерации¹, и представляет собой комплекс мероприятий и мер, направленных на обеспечение качества выполнения строительно-монтажных работ, соблюдение сроков, объема, стоимости строительства, соответствие проектной документации и нормативным требованиям. Понятие «строительный контроль» объединяет технический надзор заказчика, авторский надзор и производственный контроль, который позволяет заказчику контролировать, что работы выполняются надлежащим образом и вовремя, качество строительных материалов отвечает стандартам, а расходы соответствуют заявленной смете [1].

Таким образом, при приемке этапов строительных работ и подписании акта о приемке выполненных работ (формы КС-2 утверждены постановлением Госкомстата РФ от 11 ноября 1999 г. № 100²) инспектор строительного контроля должен удостовериться, что объемы выполненных земляных работ соответствуют заявленным, возведенные объекты не имеют отклонений от проектных значений. При возведении или реконструкции крупных площадных либо протяженных объектов объективная оценка выполненных работ на объекте затруднительна из-за существенных трудозатрат. Например, только для контроля положений опор контактной сети, установленных через 40 м на участке реконструкции железной дороги в 10 км, при использовании приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в режиме «стой-иди» понадобится больше 4 часов работы только по геодезической съемке и больше 2 часов — на камеральную обработку геодезических измерений³. С учетом того, что инспектору строительного контроля надо проконтролировать положение не только опор, но и всех зданий, сооружений и стационарных технических объектов (таких, например, как стрелочные переводы), а также подтвердить объемы выбранного и насыпанного грунта, задача по геодезической съемке может занять существенно большее время.

1 Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (ред. от 25 декабря 2023 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 1 мая 2024 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/12138258/?ysclid=m9mjbxqdj3840696906> (дата обращения: 09.06.2024).

2 Постановление Госкомстата РФ от 11 ноября 1999 г. № 100 «Об утверждении унифицированных форм первичной учетной документации по учету работ в капитальном строительстве и ремонтно-строительных работ». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/12117360/?ysclid=m9mjf12eev192403550> (дата обращения: 25.10.2024).

3 ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. М.: ЦНИИГАиК, 2002. 124 с.

Для упрощения задачи инспектора по контролю выполненных работ на объекте строительства и существенного сокращения геодезических работ целесообразным представляется применение методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это также позволит повысить объективность и достоверность получаемых результатов, исключить влияние человеческого фактора на объективность оценки качества и объемов выполняемых работ. Кроме того, материалы ДЗЗ позволят инспектору строительного контроля проводить контроль строительного объекта более адресно: посещать только те места объекта, где, по данным ДЗЗ, выявляются несоответствия выполненных работ проектной документации или графику выполнения.

Применение спутниковых данных ДЗЗ позволяет получать геопривязанное многоспектральное изображение земной поверхности. Выполнение 1 км² топографической съемки обходится на порядок дороже, чем съемка с космических аппаратов с последующей обработкой и векторизацией, и несравнимо с ней по трудозатратам [2].

Следует отметить, что, хотя для топографических задач при составлении и обновлении планов масштаба 1 : 5000 и мельче использование спутниковой съемки целесообразно, такой метод пригоден только для определенного круга задач строительного контроля, так как спутниковые данные имеют ряд ограничений.

2 Материалы и методы

В 2009 году для железнодорожного транспорта была разработана технология мониторинга потенциально опасных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры с использованием данных спутниковой съемки. Выполненные работы позволили на основе данных спутниковой съемки и наземных обследований провести ландшафтно-геоморфологическое дешифрирование и выполнить линейное зонирование трассы железной дороги: выделить участки, характеризующиеся различными комплексами экзогенных воздействий (склоновых и русловых) и разной степенью опасности этих воздействий для железнодорожной инфраструктуры.

Результатом работ по спутниковому мониторингу, проведенных на участке Туапсе — Адлер в 2011–2012 годах, явилась карта потенциально опасных воздействий русловых и склоновых процессов на железную дорогу. Достоверность полученных результатов подтверждается путем сравнения прогнозируемого и фактического количества аварийных ситуаций, спровоцированных экзогенными процессами на данном участке за 2012–2013 годы.

В 2021 году была выполнена работа по внедрению технологий аэрокосмического мониторинга с целью информационного обеспечения деятельности ОАО «РЖД» в рамках реализации объектов развития железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона (железнодорожной сети в границах Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог, протянувшейся на 17 тысяч км через более чем 800 станций в 17 регионах России, включающей Байкало-Амурскую магистраль и существенную часть Транссибирской железнодорожной магистрали). В рамках этой работы были выполнены пилотные проекты по мониторингу строительных объектов с применением материалов космической съемки и аэрофотосъемки (АФС) с беспилотных авиационных систем (БАС) на нескольких участках строительства и реконструкции Байкало-Амурской магистрали [3].

Хотя спутниковое ДЗЗ можно эффективно применять для мониторинга труднодоступных районов в связи с тем, что весь процесс от получения спутникового снимка до его дешифрирования можно выполнять камерально, без необходимости выезда специалистов на место, выполненные пилотные проекты продемонстрировали ряд ограничений для применения спутниковой съемки в процессе строительного контроля:

- зависимость от облачности;
- избыточное покрытие одного кадра;
- отсутствие у некоторых космических аппаратов возможности выполнять стереосъемку, необходимую для контроля объемов перемещенного грунта;
- недостаточное пространственное разрешение для решения большинства задач строительного контроля.

Кроме того, стоит отметить, что оперативная спутниковая информация с пространственным разрешением выше 3 м/пиксель с отечественной спутниковой группировки на момент окончания 2021 года была недоступна, что не позволило с высокой детальностью и точностью контролировать ход строительства, определять типы и объемы выполненных на участке строительства работ, тип строительной техники, задействованной на участке строительства.

В то же время пилотные проекты, выполненные в рамках данной работы, показали эффективность мониторинга с БАС:

- возможность осуществлять съемку вне зависимости от облачности;
- на порядок более высокое пространственное разрешение получаемых снимков, позволяющее решать большинство задач строительного контроля.

Следует отметить, что строительный мониторинг с использованием АФС с БАС имеет ряд ограничений. АФС не позволяет контролировать работы, ведущиеся в закрытых от внешнего обзора пространствах: внутренние работы в зданиях, зимние работы в каркасно-тентовых укрытиях (теплицах), работы внутри водопропускных труб, в подмостовом пространстве и т. д. Кроме того, при работах по прокладке кабельных линий можно детектировать только траншеи, в отдельных случаях видна укладка кабеля, но точно указать принадлежность кабеля и его количество не представляется возможным. Трудно также детектируется установка наземного оборудования устройств сигнализации, централизации и блокировки. На ортофотоплане хорошо различимы ящики с оборудованием и релейные шкафы, но невозможно определить их принадлежность. При анализе продуктов обработки данных АФС с БАС затруднен также подсчет количества работников в связи с тем, что люди в процессе АФС перемещаются и в ходе фотограмметрической обработки исключаются из плотного облака точек [4].

Задачи строительного мониторинга железнодорожной инфраструктуры на основе данных ДЗЗ с БАС делят на два основных типа, исходя из пространственных характеристик объектов мониторинга:

- 1) мониторинг протяженных объектов, где длина объекта многократно превышает его ширину (перегоны);
- 2) мониторинг площадных объектов, где длина объекта не превышает его ширину более чем в 10 раз (станции, искусственные сооружения и т. п.).

Задачи первого типа целесообразно решать с применением БАС, имеющей в своем составе беспилотное воздушное судно (БВС) самолетного типа. Такой тип БВС обладает большей скоростью перемещения и, как следствие, большей дальностью полета в сравнении с мультикоптерным типом. Для решения задач второго типа более применима БАС с БВС мультикоптерного типа. Мультикоптерный тип БВС обладает большей маневренностью и возможностью взлета и посадки на ограниченном пространстве.

Таким образом, на основании проведения пилотных проектов было продемонстрировано, что для мониторинга работ на объектах строительства целесообразно применять материалы АФС с БАС.

За рубежом также апробируется применение БАС для мониторинга строительных объектов в целях повышения эффективности и качества строительства [4]. На нескольких объектах строительства была проведена апробация использования АФС с БАС для строительного мониторинга, и по ее результатам были сформированы ортофотоплан, трехмерная модель строительного объекта и цифровая модель рельефа. Было продемонстрировано, что по результатам АФС можно определять объемы перемещенного грунта и проводить точные измерения планового и высотного положений объекта строительства [5, 6].

Несмотря на то, что были получены хорошие результаты, применимые для строительного контроля как за рубежом, так и в России [7–9] (в том числе при дорожном строительстве [10]), упоминания о создании технологии, ее тиражировании и включении в строительный процесс в открытой печати не обнаружены.

3 Результаты и обсуждение

Апробация АФС с БАС как метода строительного мониторинга была выполнена в 2021 году на двух тестовых участках строительства и реконструкции Байкало-Амурской магистрали. По материалам АФС были сформированы продукты — ортофотопланы и трехмерные модели. Пространственное разрешение продуктов АФС составило 3–5 см/пиксель (в зависимости от высоты съемки), а пространственная точность — 5 см. На основании их обработки и анализа были продемонстрированы возможность уверенного распознавания типов строительных работ с контролем их плановой и высотной точности, возможность подсчета и распознавания типов строительной техники. Был также показан подсчет объемов перемещенного грунта на месторождении горных пород в районе разъезда Звонкое в Селемджинском районе Амурской области (рис. 1) по материалам АФС с разницей 4 дня.

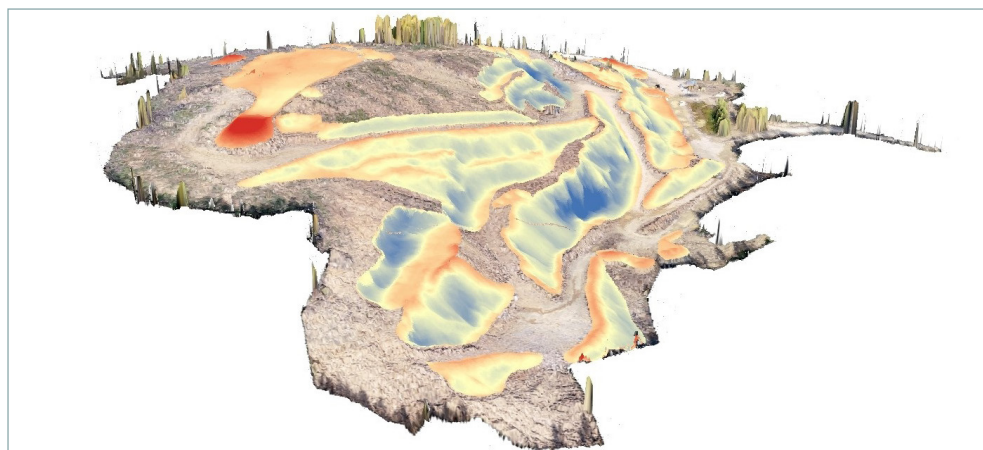
Рис. 1 

3D-модель изменений физических объемов на месторождении горных пород (оттенками синего цвета показаны участки уменьшения объема, оттенками красного — увеличения)

Fig. 1

A 3D model of changes in physical volumes at a rock deposit (shades of blue show areas of decreasing volume, shades of red show areas of increasing volume)

0 50 100 м



На основании апробации и подтверждения возможности применения АФС с БАС для строительного контроля в 2022 году была разработана специальная методика строительного контроля. При создании методики решались задачи привязки проектной документации, периодичности выполнения аэросъемки, состава отчетов, предоставления доступа к итоговым материалам причастных лиц.

Таким образом, методика строительного контроля с применением аэросъемки состоит из трех этапов:

- 1) подготовительного камерального этапа;
- 2) полевых работ, связанных с выполнением аэросъемки;
- 3) камеральных работ по обработке аэросъемки и формированию отчетных материалов.

Подготовительный этап включает формирование графика производства работ, которые возможно дешифрировать по материалам аэросъемки, привязку проектной документации в геоинформационной системе (ГИС), векторизацию строительных объектов, указанных в графике производства работ, дешифрируемых по ортофотоплану для последующего анализа плановой точности возведения объектов. Кроме того, выполняется оцифровка проектных поперечных профилей земляного полотна для последующего сравнения с фактическим профилем.

Рис. 2 ↻

Схема размещения опознаков на полигоне авиационных работ

Fig. 2

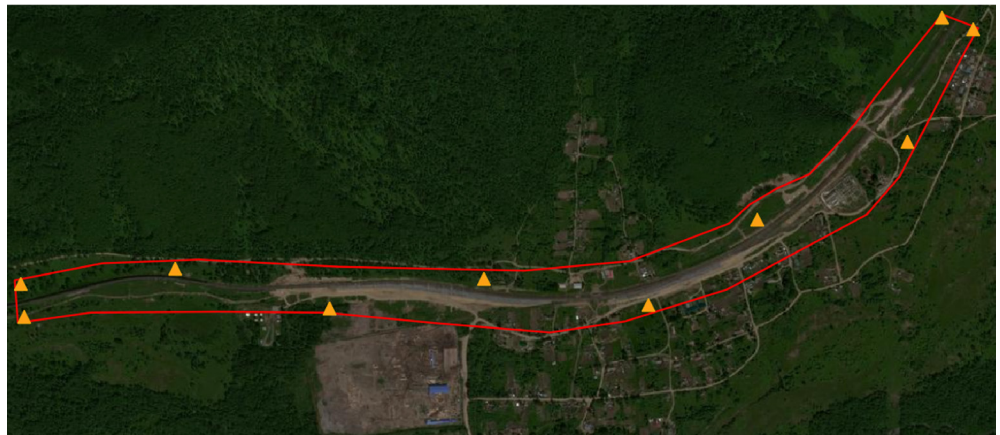
The layout of identification signs at the aviation works site

Рис. 3 ⌵

Координирование опознака на полигоне авиационных работ

Fig. 3

Coordination of identification at the aviation works site



Во время этапа полевых работ на полигоне авиационных работ (ПАР) размещаются и координируются опознаки, используемые для уменьшения невязки проектной документации с ортофотопланом, построенным по материалам АФС с БАС (рис. 2). Координирование опознаков выполняется в местной системе координат субъекта РФ, в которой расположен объект, в увязке с пунктами опорной геодезической сети, сформированной на этапе инженерно-геодезических изысканий (рис. 3).

В соответствии с разработанной методикой, АФС выполняется дважды в месяц: с 5-го по 25-е число с промежутком не менее 7 дней, по второй АФС выполняется мониторинг строительства. Кроме того, для объектов, спроектированных с применением технологий информационного моделирования (ТИМ), дополнительно к АФС выполняется воздушное лазерное сканирование (ВЛС) для более детального отображения сложных конструкций.

Материалы АФС должны иметь межкадровое продольное перекрытие не меньше 80 % и поперечное не меньше 70 % и позволять формировать фотограмметрические материалы с пространственным разрешением не хуже 3 см/пиксель. Точность пространственной привязки материалов АФС должна позволять сформировать фотограмметрические материалы со среднеквадратической погрешностью (СКП) меньше 5 см. АФС должна выполняться в светлое время суток (высота солнца над горизонтом не менее 20 градусов), с отсутствием помех в виде тумана, и (или) дымки, и (или) осадков.

При выполнении ВЛС точность определения дальности точки лазерного отражения (ТЛО) должна быть не более 3 см. СКП определения координат ТЛО должна быть меньше 3–5 см. Количество ТЛО должно составлять не менее 400 на 1 м². Количество ТЛО при выполнении ВЛС высоковольтных линий, линий связи и контактной сети — не менее 800 на 1 м². Облако ТЛО окрашивается в цвет, соответствующий цвету поверхности объекта, а также в цвет, зависящий от высоты объекта.

Затем выполняется обработка материалов аэросъемки. Результатами фотограмметрической обработки АФС, по которым в дальнейшем производится оценка объемов земляных работ и дешифрирование, служат цифровая модель местности (ЦММ) и ортофотоплан. Результатом обработки ВЛС выступает классифицированное и фильтрованное облако ТЛО.

По материалам АФС и ВЛС выполняется анализ состояния объекта строительства, представляющий собой оценку выполненных работ, сравнение проектного и фактического поперечных профилей земляного полотна, определение количества и типов строительной техники на объекте, а также объемов выполненных земляных работ.

Оценка выполненных работ проводится только по строительным работам, ведущимся в пространствах, открытых для обзора сверху и различимых на ортофотоплане с пространственным разрешением 3–5 см. Примером таких работ могут выступать формирование земляного полотна, укладка рельсошпальной решетки, балластировка, установка опор ЛЭП и контактной сети, монтаж светофоров и стрелочных переводов, а также строительство зданий и сооружений.

ЦММ применяется для сравнения проектного и фактического поперечных профилей земляного полотна, а также для оценки объемов выполненных земляных работ на объекте (разработки котлованов, отсыпки насыпей и т. п.).

На основании анализа материалов обработки аэросъемки формируется отчет. Отчет состоит из нижеследующих разделов.

Раздел **«Общие сведения»** представляет собой общую информацию об объекте (участке выполнения работ), на котором запланирован контроль работ с применением БАС. В данном разделе представлены ссылки на требования, предъявляемые к материалам отчета, календарный график производства работ, а также общие сведения по выполненной аэросъемке, которые могут повлиять на качество полученных с БАС данных: дата проведения, погодные условия (температура, направление и скорость ветра, наличие / отсутствие осадков). В разделе также представлены схема участка выполнения работ на объекте и таблица, содержащая список видов строительных работ, требующих контроля выполнения с применением АФС, подготовленная на основе календарного графика производства работ.

Раздел **«Состояние опознаков на объекте»** содержит информацию об опознаках, размещенных на ПАР: их состояние, количество, фактическое местоположение.

Раздел **«Динамика выполнения работ»** включает плановые и фактические показатели по каждому виду строительных работ, требующих контроля объемов с применением АФС (согласно таблице из раздела «Общие сведения»), а также процент завершения задачи в отчетном месяце, процент завершения задачи нарастающим итогом и процент завершения задачи за весь период проведения работ.

Раздел **«Сравнение фактического поперечного профиля земляного полотна с проектным»**. По данным из проектной документации строится проектная поверхность. Далее при помощи специализированных инструментов по линиям расположения проектных профилей, проведенным по проектной документации, строится график из трех линий, одна из которых представляет собой профиль, построенный по проектной поверхности, другая — профиль по фактической поверхности на предыдущий месяц, третья — профиль по фактической поверхности на текущий месяц (рис. 4). Для сравнения с проектной поверхностью используется ЦММ, построенная по результатам аэрофотосъемки.


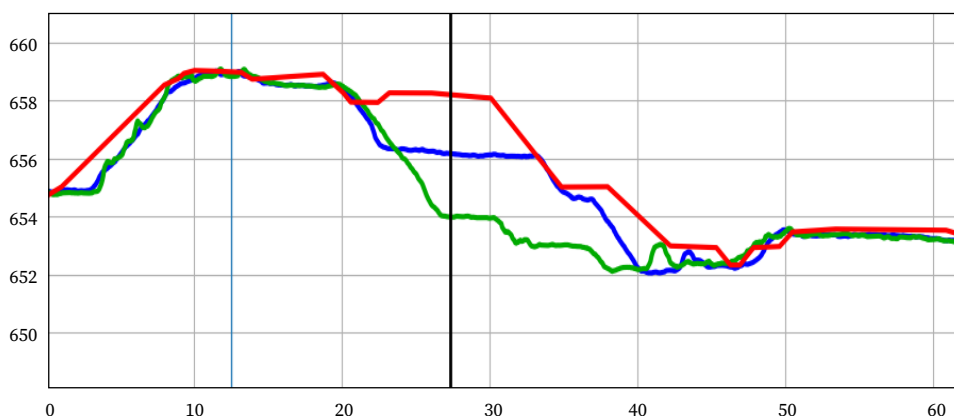
Рис. 4  Сравнение профилей земляного полотна

Fig. 4
Comparison of the profiles of the roadbed

— проектный профиль
— профиль прошлого месяца
— фактический профиль, построенный по ЦММ



Раздел **«Оценка объемов земляных работ на объекте»** содержит результаты оценки объемов земляных работ, которая производится по ЦММ, построенным на основе результатов аэрофотосъемки с применением БАС, произведенной в предыдущий и текущий месяцы. При помощи специализированных инструментов выполняется вычитание из поздней ЦММ более ранней. В результате вычитания формируется поверхность, содержащая в себе изменения, произошедшие за период между двумя съемками (рис. 5).

Раздел **«Попикетная ведомость наблюдаемых работ»** содержит краткую информацию о ходе выполнения строительных работ на каждом пикете

Рис. 5 

Пример оценки отсыпки грунта объемом 1160 м³ на перегоне Восточно-Сибирской железной дороги (отсыпка произведена между 12 и 24 августа 2023 г.)

Fig. 5

An example of an assessment of the filling of soil with a volume of 1160 m³ on the stretch of the East Siberian Railway (the filling was carried out between August 12 and 24, 2023)



Рис. 6 

Пример контроля динамики сооружения устоев моста на Восточно-Сибирской железной дороге на ортофотоплане по состоянию на 1 июня 2023 г.

Fig. 6

An example of monitoring the dynamics of the construction of bridge abutments on the East Siberian Railway on an orthophotoplane as of June 1, 2023



объекта (участка производства работ), представленную в виде таблицы. Таблица состоит из пяти столбцов: «Порядковый номер», «Номер пикета», «Работы», «Фотография» (рис. 6), «Примечания».

Раздел **«Воздушное лазерное сканирование на объекте»** формируется в отчете только по объектам, на которых выполнялось ВЛС. В разделе приведены графические материалы по данным ВЛС и IFC-моделей, описывающие состояние объекта, дана оценка выполненным работам.

Раздел **«Складирование строительных материалов на объекте»** содержит фрагменты ортофотоплана на места складирования строительных материалов с указанием его фактического расположения.

Раздел **«Строительная техника на участке строительства»** включает общую схему расположения всей строительной техники на участке проведения работ, наименование строительной техники, ее количество, фактическое местоположение, а также фрагменты ортофотоплана с ее наглядным отображением (рис. 7).

Отработка методики строительного контроля выполнялась до декабря 2022 года на 12 объектах строительства Восточного полигона общей протяженностью 87 км. В 2023 году началась промышленная эксплуатация методики

Рис. 7 

Примеры контроля наличия строительной техники на участке строительства

Fig. 7

Examples of monitoring the availability of construction equipment at the construction site

Экскаватор на Дальневосточной железной дороге 7 ноября 2022 г. / An excavator on the Far Eastern Railway on November 7, 2022



Каток на Восточно-Сибирской железной дороге 13 сентября 2022 г. / A roller on the East Siberian Railway on September 13, 2022

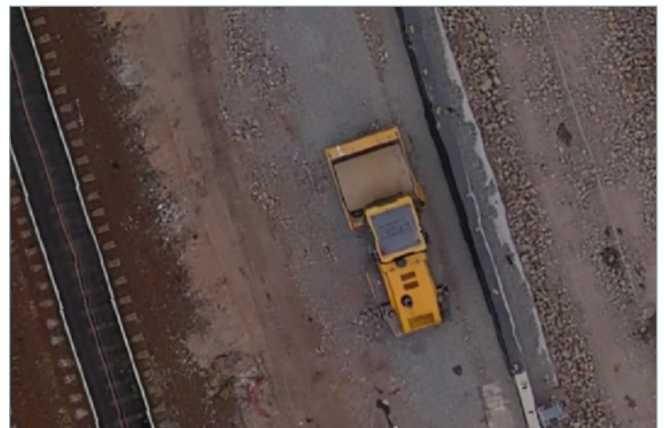


Рис. 8 

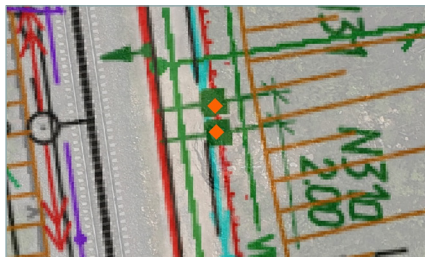
Выявление отклонения мест установки опор на ортофотопланах

Fig. 8

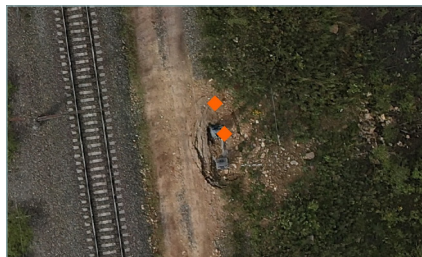
Identification of deviations of the installation sites of supports on orthophotoplanes

на 16 объектах строительства Восточного полигона общей протяженностью более 200 км. В 2024 году общая протяженность объектов строительства Восточного полигона, строящихся с использованием методики строительного контроля, которая включает аэросъемку, увеличилась до 366 км. Методика позволила оперативно выявлять отклонения от проекта (рис. 8), несоответствия графику выполнения работ и объемов перемещенного грунта, что значительно сократило трудозатраты инспекторского состава при приеме работ.

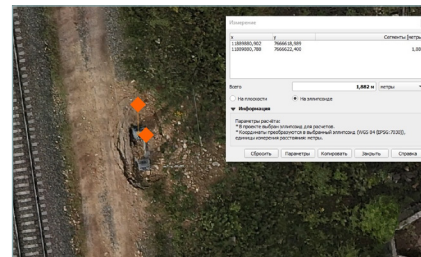
Привязанный в ГИС проект с отмеченными центрами опор (оранжевые ромбы) / A GIS-linked project with marked support centers (orange rhombuses)



Фактическое положение опор в сравнении с проектным положением (оранжевые ромбы) / The actual position of the supports in comparison with the design position (orange rhombuses)



Измерение отклонения (1,9 м) / Measurement of the deviation (1.9 m)



4 Выводы

Применение БАС при проведении контроля на объектах строительства позволяет объективно оценить темпы работ, соответствие фактического положения объектов строительства проектной документации, а также получить точную информацию об объемах земляных работ. По данным аэрофотосъемки проводится подсчет строительной техники на объекте, что практически невозможно провести силами инспекторского контроля на объекте протяженностью 15–20 км.

Сравнение сформированных на основе данных с БАС ортофотопланов и проектной документации проводится в оперативном режиме с точностью 3–5 см в плане и по высоте, что существенно сокращает объемы работ (вплоть до полного их исключения) геодезических бригад заказчика на объекте, а также позволяет оперативно устранять выявленные недостатки. Данные строительного мониторинга, основанные на средствах объективного контроля, в конечном итоге будут увязаны с ТИМ и использованы для анализа и сопоставления данных с проектными данными ТИМ-модели, а также для актуализации и сопровождения строительства объекта, спроектированного с применением ТИМ. Разработанная методика позволяет дистанционно получать объективные данные строительного контроля и более четко контролировать соответствие фактического состояния объекта его проектному состоянию.

Каждый строительный объект, несомненно, является уникальным по своим свойствам для строительного контроля, осуществляемого как классическими геодезическими методами, так и методом с применением БАС (транспортная доступность, покрытие сигналом от базовых ГНСС-станций, рельеф окружающей местности и т. д.). Тем не менее приведем ориентировочную оценку для строительного контроля объекта с реконструкцией двух станций и строительством второго пути длиной 20 км. Для строительного мониторинга такого объекта с применением технологии БАС необходимы: 1) выполняющая аэросъемку и геодезическое обоснование ПАР бригада из двух человек; 2) обрабатывающий и анализирующий материалы аэросъемки коллектив, также состоящий из двух человек. Время, требуемое для выполнения геодезического обоснования и аэросъемки указанного полигона, составляет 2 рабочих дня, а время для обработки и анализа данных — 4 рабочих дня. В то же время для получения данных такой же полноты классическими методами геодезии необходим труд как минимум четырех геодезистов в течение десяти рабочих дней.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Гришина А.И., Рамазанов Р.Р., Глухов А.В. и др. Комбинирование методов наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для повышения эффективности контроля промышленного строительства // Вектор ГеоНаук. 2020. Т. 3. № 3. С. 55–67. DOI:10.24411/2619-0761-2020-10032.
2. Чермошенцев А.Ю. Обновление топографических планов масштаба 1 : 5000 с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения // Сборник материалов VIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. № 4. С. 29–32.
3. Щеглов М.А., Карелов А.И., Майоров А.А. и др. Мониторинг объектов строительства железнодорожной инфраструктуры с применением данных с беспилотных авиационных систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. № 5. С. 153–164. DOI:10.30533/GiA-2023-069.
4. Ham Y., Han K.K., Lin J.J., et al. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works // Visualization in Engineering. 2016. Vol. 4. P. 1–8. DOI:10.1186/s40327-015-0029-z.
5. Taj G., Prema R., Anand S., et al. Monitoring and Management of Construction Sites Using Drone // Proceedings of International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Developmen. Cham: Springer, 2021. P. 705–720.
6. Anwar N., Amir Izhar M., Najam F.A. Construction Monitoring and Reporting using Drones and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // The Tenth International Conference on Construction in the 21st Century (Colombo, Sri Lanka, July 2–4, 2018). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/326264559_Construction_Monitoring_and_Reporting_using_Drones_and_Unmanned_Aerial_Vehicles_UAVs (дата обращения: 24.09.2024).
7. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В. и др. Дрон-технологии в строительстве — современные решения и возможности // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12. № 5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf> (дата обращения: 18.10.2024).
8. Кудасова А.С., Тютина А.Д., Сокольников Э.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. Т. 8. № 80. С. 31–38.
9. Семенов А.С., Слонич К.А. Обследования зданий и сооружений с применением беспилотных летательных аппаратов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 160–163. DOI:10.12737/article_59a93b0c110aa8.01447096.
10. Ворсин Н.Е., Яковлев А.Е. Применение БПЛА в проектировании и строительстве автомобильных дорог // Вестник науки. 2024. Т. 5. № 74. С. 1059–1062.


АВТОРЫ **Щеглов Михаил Александрович**

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

 0009-0000-2212-5793


Карелов Алексей Игоревич

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

Павловский Андрей Александрович

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

 0009-0005-5666-7538

Поступила 27.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



The methodology of collecting and analyzing heterogeneous geoinformation for solving problems of construction control at railway construction sites

Mikhail A. Scheglov¹✉, **Alexey I. Karelov¹**, **Andrey A. Pavlovsky¹**

¹ JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”, Moscow, Russia

✉ mihail_sheglov@mail.ru

CITATION Scheglov MA, Karelov AI, Pavlovsky AA. The methodology of collecting and analyzing heterogeneous geoinformation for solving problems of construction control at railway construction sites. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 23–34. DOI:10.30533/GiA-2025-011.

KEYWORDS construction control, aerial photography, unmanned aerial vehicle, railway, orthophotoplane, digital terrain model, cross-profile construction, calculation of excavation volumes, photogrammetry, satellite data, remote sensing of the Earth

ABSTRACT In the process of construction, reconstruction, major repairs of capital construction projects in accordance with the legislation of the Russian Federation, construction control is carried out aimed at checking the compliance of the work performed with the design documentation requirements of technical regulations, the results of engineering surveys, the requirements for the construction, reconstruction of the capital construction project. Construction control performed by traditional methods is associated with significant labor costs when implemented on large area or extended objects. The authors of the article describe the experience of using aerospace remote sensing methods of the Earth, aimed at simplifying the task of the inspector to control the work performed at the construction site and significantly reducing the volume of geodetic work. The advantages and disadvantages of various remote sensing methods are given when applied in the course of construction control. The requirements for aerial photography materials obtained by unmanned aerial systems necessary for the formation of orthophotomaps, digital terrain models, point clouds of laser reflections, etc. are described. The structure of the report generated on the basis of a comprehensive analysis of Earth remote sensing data and design documentation is described. The final section of the article describes the positive effects obtained from the application of the method, as well as the prospects for using the information obtained at facilities designed using information modeling technologies in construction.

- REFERENCES**
1. Grishina AI, Ramzanov RR, Glukhov AV, et al. Kombinirovanie metodov nazemnogo lazernogo skanirvaniya i ajerofotos"emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata dlja povysheniya jeffektivnosti i kontrolja promyshlennogo stroitel'stva [Combination of surface laser scanning and aerosurveying methods using unnamed aerial vehicle for industrial engineering control efficiency improvement]. *Vector of Geosciences*. 2020;3(3): 55–67. (In Russian). DOI:10.24411/2619-0761-2020-10032.
 2. Chermoshentsev AYu. Obnovlenie topograficheskikh planov masshtaba 1 : 5000 s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov sverhvyssokogo razresheniya [Large-scale maps updating using very high-resolution satellite images]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of VIII International scientific congress*. Novosibirsk: SSGA; 2012;1(4): 29–32. (In Russian).
 3. Scheglov MA, Karelov AI, Mayorov AA, et al. Monitoring ob"ektov stroitel'stva zheleznodorozhnoj infrastruktury s primeneniem dannykh s bespilotnykh aviacionnykh sistem [Monitoring of railway infrastructure construction facilities using UAS data]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2023;67(5): 153–164 (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-069.
 4. Ham Y, Han KK, Lin JJ, et al. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering*. 2016;4: 1–8. DOI:10.1186/s40327-015-0029-z.
 5. Taj G, Prema R, Anand S, et al. Monitoring and Management of Construction Sites Using Drone. *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development*. Cham: Springer, 2021: 705–720.
 6. Anwar N, Amir Izhar M, Najam FA. Construction Monitoring and Reporting using Drones and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *The Tenth International Conference on Construction in the 21st Century (Colombo, Sri Lanka, July 2–4, 2018)*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/326264559_Construction_Monitoring_and_Reporting_using_Drones_and_Unmanned_Aerial_Vehicles_UAVs (Accessed 24 September 2024).
 7. Noskov IV, Noskov KI, Tinenskaja SV, et al. Dron-tehnologii v stroitel'stve – sovremennye reshenija i vozmozhnosti [Drone technologies in construction – modern solutions and opportunities]. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020;5(12). (In Russian). Available from: <https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf> (Accessed 18 October 2024).
 8. Kudasova AS, Tjutina AD, Sokol'nikova JeV. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v stroitel'stve [The appliance of unmanned aerial vehicles in construction]. *Engineering Journal of Don*. 2021;8(80): 31–38. (In Russian).
 9. Semenov AS, Slonich KA. Obsledovaniya zdaniy i sooruzhenij s primeneniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Surveys of buildings and structures using unmanned aerial vehicles]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;9: 160–163. (In Russian). DOI:10.12737/article_59a93b0c110aa8.01447096.
 10. Vorsin NE, Jakovlev AE. Primenenie BPLA v proektirovanii i stroitel'stve avtomobil'nykh dorog [The use of UAVs in the design and construction of highways]. *Vestnik nauki*. 2024;5(74): 1059–1062. (In Russian).


AUTHORS **Mikhail A. Scheglov**

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

 0009-0000-2212-5793


Alexey I. Karelov

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

 0009-0005-9533-6483

Andrey A. Pavlovsky

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

 0009-0005-5666-7538

Submitted: November 27, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Геометрическая калибровка цифровых фотокамер с длиннофокусным объективом по серии снимков с общим центром проекции

В.Е. Чернышев¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

kwikun@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Чернышев В.Е. Геометрическая калибровка цифровых фотокамер с длиннофокусным объективом по серии снимков с общим центром проекции // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-012.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА калибровка, цифровая камера, длиннофокусный объектив, центр проекции, входной зрачок, оптическая система, фотограмметрия

АННОТАЦИЯ В статье представлены результаты калибровки цифровых фотокамер, оснащенных длиннофокусным объективом, по серии изображений с общим центром проекции. При калибровке камер с длиннофокусным объективом на стандартных тест-объектах параметры калибровки определяются с низкой точностью, а в некоторых случаях калибровка невозможна. На каждый снимок попадает малое количество маркированных точек тест-объекта, угол засечки острый, недостаточная глубина резкости (разница в положении дальней и ближней точек). Очевидно, что для калибровки камер с длиннофокусными объективами необходимо спроектировать специальный тест-объект. Автор предлагает другой подход к процессу калибровки. Камера устанавливается на штатив с панорамной головкой, используемой фотоаппаратами для получения сферических панорам; главное условие панорамной съемки — центр вращения фотоаппарата и центр проекции оптической системы объектива должны находиться в одной точке. В статье также представлена краткая теория центральной проекции с точки зрения оптики. Описаны основные заблуждения, связанные с центром проекции и узловыми точками. Рассмотрены понятия входного и выходного зрачков оптической системы, а также их роли в оптической системе объектива.

1 Введение

В XXI веке фотограмметрические методы стали более доступными, так как больше не требуют специализированного оборудования для обработки снимков и наличия профессиональной фототехники [1]. Подвергнув обычную цифровую фотокамеру (ЦФК) ряду подготовительных работ, можно использовать ее для целей фотограмметрии [2]. В частности, неметрические камеры используются на беспилотных летательных аппаратах и в наземной фотограмметрии.

Одним из важнейших этапов фотограмметрической съемки является калибровка ЦФК. В ходе калибровки вычисляются параметры внутреннего ориентирования камеры, а также искажения, вызванные дисторсией. Дисторсия — абберация оптической системы, нарушающая геометрическое подобие между объектом и его изображением¹ [3, 4]. Вычисление параметров калибровки позволяет использовать неметрические камеры для целей фотограмметрии² [5, 6].

Лабораторные тест-объекты ориентированы на калибровку коротко- и длиннофокусных объективов. При использовании данных тест-объектов для калибровки длиннофокусных объективов в кадр попадает малое количество точек из-за небольшого (порядка 10°) угла поля зрения. По этой причине параметры ЦФК определяются с низкой точностью.

Сильнее всего это отражается на точности определения фокусного расстояния, так как при использовании длиннофокусных объективов угол засечки между проектирующими лучами при центральной проекции (угол поля зрения) оказывается острым. По этой причине длиннофокусные объективы в наземной фотограмметрии практически не применяются. Производители длиннофокусных объективов для фотограмметрии, как правило, поставляют их без калибровки. Несмотря на это, в практике фотограмметрических съемок бывают ситуации, когда не обойтись без длиннофокусных объективов (например, когда требуется высокая детализация снимков или объект съемки находится на значительном расстоянии). Проблеме калибровки длиннофокусных объективов посвящен ряд статей в зарубежных изданиях [7–9].

В данной статье рассматриваются результаты калибровки ЦФК с длиннофокусными объективами по методике калибровки с дополнительными геометрическими условиями. Съемка проводится при вращении камеры вокруг центра проекции оптической системы объектива. При этом все снимки будут иметь общий центр проекции, координаты которого являются определяемой величиной в системе координат тест-объекта. Общий центр проекции выступает в роли дополнительного геометрического условия при вычислении калибровочных параметров. Данная методика позволяет увеличить угол засечки и, следовательно, повысить точность определения элементов внутреннего ориентирования.

2 Материалы и методы

Длиннофокусными объективами называют объективы с фокусным расстоянием, превышающим диагональ кадра в 1,5 раза и более. В прикладных сферах также применяют термин «узкоугольный объектив». При калибровке длиннофокусных объективов на стандартных лабораторных тест-объектах на снимки попадет малое количество точек и параметры калибровки определяются с низкой точностью. Для надежного определения параметров калибровки камер глубина пространственного тест-объекта (расстояние между дальними и ближними

1 Можаров Г.А. Теория аббераций оптических систем: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2021. 288 с.

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

точками) должна быть не менее $0,5H$, где H — расстояние от точки фотографирования до калибровочного тест-объекта³. По этому условию тест-объект для калибровки длиннофокусных объективов должен обладать большой пространственной глубиной, в некоторых случаях составляющей десятки и сотни метров. На практике создать такой тест-объект практически невозможно. Не стоит забывать, что длиннофокусные объективы обладают малой глубиной резкости и при большой пространственной глубине тест-объекта точки на разном уровне могут быть не в фокусе.

Для калибровки длиннофокусных объективов на тест-объектах с малой пространственной глубиной можно задать дополнительные геометрические условия определения центра проекции. Для этого необходимо сделать серию снимков пространственного тест-объекта, вращая камеру вокруг центра проекции оптической системы. Далее следует выполнить калибровку по серии снимков с условием единого центра проекции снимков, являющегося при этом определяемой величиной. Уравнения поправок для трех снимков с общим центром проекции имеют вид

1 ♡

$$\begin{cases} a_1\delta X_s + a_2\delta Y_s + a_3\delta Z_s + a_4\delta\omega_1 + a_5\delta\alpha_1 + a_6\delta\aleph_1 + a_7\delta\omega_2 + a_8\delta\alpha_2 + a_9\delta\aleph_2 + a_{10}\delta\omega_3 + a_{11}\delta\alpha_3 + a_{12}\delta\aleph_3 + l_y = V_y, \\ b_1\delta X_s + b_2\delta Y_s + b_3\delta Z_s + b_4\delta\omega_1 + b_5\delta\alpha_1 + b_6\delta\aleph_1 + b_7\delta\omega_2 + b_8\delta\alpha_2 + b_9\delta\aleph_2 + b_{10}\delta\omega_3 + b_{11}\delta\alpha_3 + b_{12}\delta\aleph_3 + l_x = V_x, \end{cases}$$

где $a_1, a_2 \dots a_{12}, b_1, b_2 \dots b_{12}$ — частные производные от исходных уравнений по неизвестным (коэффициенты уравнения поправок);
 δ — поправки к элементам внешнего ориентирования снимка;
 X_s, Y_s, Z_s — координаты центра проекции;
 ω, α, \aleph — угловые элементы внешнего ориентирования;
 l_y, l_x — свободные члены.

Дальнейшее решение выполняется по общепринятым алгоритмам.

Ранее данный метод был проверен на макетных снимках и показал хорошие результаты в сравнении со стандартными методами лабораторной калибровки ЦФК. Результаты экспериментов на макетных снимках представлены в предыдущей работе автора [10].

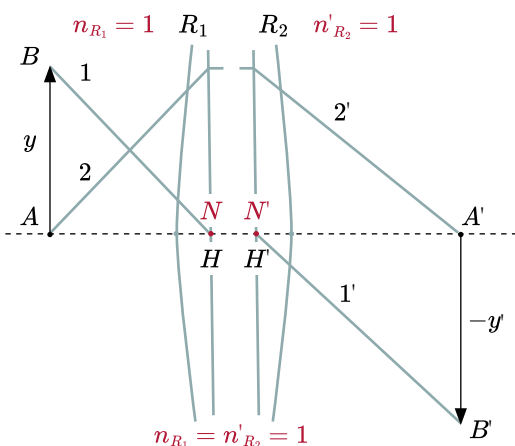
2.1 О центре проекции объектива

Рис. 1 ♡

Определение положения узловых точек N, N' в воздухе ($n_{R_1} = n'_{R_2} = 1$)

Fig. 1

The front and rear nodal points N, N' in air ($n_{R_1} = n'_{R_2} = 1$)



Важным условием рассматриваемого метода калибровки является вращение ЦФК вокруг точки, совпадающей с центром проекции оптической системы объектива. Но что является центром проекции оптической системы ЦФК?

В материалах по основам оптики, фотограмметрии и аэрофотосъемки можно увидеть одну и ту же схему, показывающую построение изображения в простой оптической системе (рис. 1). Большое внимание уделено узловым точкам объектива.

Узловые точки — две сопряженные точки оптической системы. Луч 1 из внеосевой точки B предмета AB , направленный в переднюю узловую точку N , выходит через заднюю узловую точку N' оптической системы, заданной поверхностями R_1 и R_2 , под тем же самым углом, что и падающий луч, т. е. $\alpha_N = \alpha'_{N'}$. Для системы, расположенной в воздухе ($n_{R_1} = n'_{R_2} = 1$), узловые точки N, N' совпадают с главными точками H, H' , и угловое увеличение $y = \alpha'_{N'}/\alpha_N$ в этих плоскостях равно единице⁴. Передняя узловая точка находится в пространстве объекта, задняя — в пространстве изображения. Расстояние от задней узловой точки до плоскости фотоприемника (пленка или матрица) равно фокусному расстоянию объектива.

Глядя на эту схему, логично предположить, что центром проекции является передняя узловая точка, расположенная

3 Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М.: Недра, 1982. 224 с.

4 Можаров Г.А. Основы геометрической оптики: учеб. пособие. М.: Логос, 2006. 280 с.

Рис. 2 ⬇
Входной и выходной зрачки
оптической системы

Fig. 2
Entrance and exit pupils
of the optical system

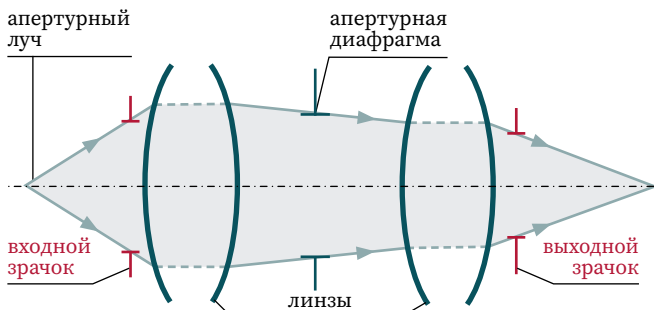


Рис. 3 ⬇
Определение центра проекции
ЦФК по двум объектам.
Расхождение объектов из-за
несоответствия точки вращения
с центром проекции ЦФК

Fig. 3
Determining the center
of projection of a digital camera
based on two objects. Divergence
of objects due to a discrepancy
between the rotation point and
the center of the digital camera
projection

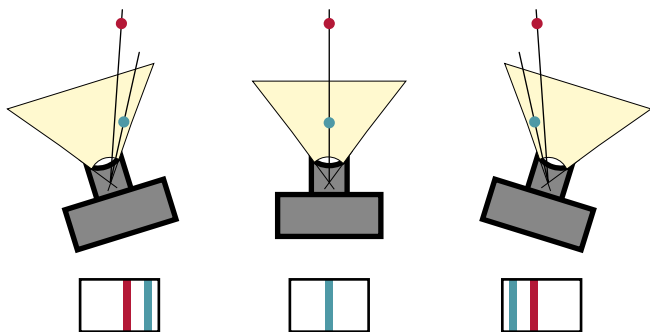


Рис. 4 ⬇
Внешняя диафрагма из крышки
для объектива

Fig. 4
External aperture from lens cap



в пространстве объектов. Однако на практике выясняется, что это не так. Например, у объектива Canon EF-S 18-135mm $f/3.5-5.6$ IS USM точка, соответствующая центру проекции оптической системы, находится за плоскостью матрицы. Из определения узловых точек следует, что это не может быть задняя узловая точка, так как она должна быть удалена от матрицы на расстояние, равное фокусному расстоянию. Она также не может быть передней узловой точкой, так как в этом случае будет располагаться позади задней.

В отличие от простой оптической системы (рис. 1), объектив представляет собой многокомпонентную оптическую систему, каждая линза которой имеет свои узловые точки; есть также узловые точки всей оптической системы. Кроме линз в объективе присутствует апертурная диафрагма, ограничивающая пучки лучей, проходящих через оптическую систему объектива. С апертурной диафрагмой связаны понятия входного и выходного зрачков (рис. 2).

Входной зрачок — параксиальное (идеальное) изображение апертурной диафрагмы через линзы, стоящие впереди. Выходной зрачок — параксиальное (идеальное) изображение апертурной диафрагмы через линзы, стоящие позади нее. Входной и выходной зрачки сопряжены. Через апертурную диафрагму проходят те лучи, которые изначально имеют направление во входной зрачок объектива. Центром проекции оптической системы объектива является центр входного зрачка⁵.

Если перед оптической системой установить дополнительную диафрагму, последняя автоматически станет входным зрачком. Если установить ее позади оптической системы, диафрагма автоматически станет выходным зрачком. Именно это можно увидеть на рис. 1, где указаны лишь основные точки оптической системы, но некоторые важные элементы опущены для упрощения. Такая схема прохождения лучей через тонкий компонент будет работать только при наличии апертурной диафрагмы. В данном случае апертурной диафрагмой является оправа и входной зрачок располагается спереди, а выходной — сзади одиночного компонента.

Теорию о том, что центром проекции объектива является центр входного зрачка, можно проверить на практике с помощью внешней диафрагмы и методики панорамной съемки. Важным условием получения сферических панорам 360 градусов является вращение камеры вокруг центра проекции объектива, в этом случае все снимки будут иметь общий центр проекции и без искажений будут совмещены в единое изображение. Для этого используются специальные панорамные штативы. Чтобы на практике найти точку вращения, соответствующую центру проекции объектива, нужно выбрать два объекта, находящиеся на одной прямой, и произвести съемку этих объектов при разных поворотах камеры (рис. 3). При этом необходимо перемещать камеру относительно панорамного штатива, чтобы найти точку, при вращении вокруг которой выбранные объекты не будут менять свое положение относительно друг друга.

Для практического эксперимента применялись ЦФК Canon EOS 70D и объектив Canon 100 мм. ЦФК была установлена в панорамный штатив, внешней диафрагмой служила крышка для объектива с отверстием в центре (рис. 4).

5 Волосов Д.С. Фотографическая оптика: учеб. пособие для киновузов. 2-е изд. М.: Искусство, 1978. 543 с.

Рис. 5 ➔

Съемка при вращении камеры вокруг центра внешней диафрагмы (центра входного зрачка). При повороте камеры объект на дальнем плане (край оконной коробки) и объект на переднем плане (вертикальная рейка) не меняют своего положения относительно друг друга

Fig. 5

Shooting while rotating the camera around the center of the outer aperture (the center of the entrance pupil). When you rotate the camera, the object in the background (the edge of the window frame) and the object in the foreground (the vertical rail) do not change their position relative to each other



В качестве объектов съемки были выбраны оконная рама на дальнем плане кадра и вертикальная планка на переднем плане. Согласно теории, диафрагма, установленная перед оптической системой, является входным зрачком, а центр входного зрачка — центром проекции ЦФК. Следовательно, при вращении камеры вокруг точки, проходящей через центр внешней диафрагмы, выбранные объекты съемки не будут менять своего положения относительно друг друга. Результаты съемки представлены на рис. 5. Как видно на снимках, объекты не меняют своего положения при вращении вокруг центра внешней диафрагмы (центра входного зрачка), следовательно, камера вращается вокруг центра проекции.

Данный эксперимент на практике показывает, что центром проекции ЦФК является центр входного зрачка оптической системы.

2.2 Практическое применение метода калибровки с общим центром проекции

Калибровка выполнялась на стандартном маркированном тест-объекте (рис. 6).

Для съемки использовались панорамные головы Manfrotto 303SPH и Nodal Ninja 4. Сведения об откалиброванных ЦФК приведены в табл. 1.

Рис. 6 ▼

Калибровочный тест-объект

Fig. 6

Calibration test object

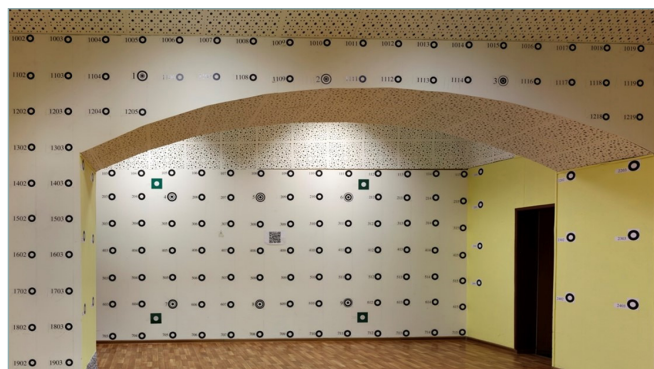


Таблица 1 ▼

Откалиброванные ЦФК

Table 1


Calibrated digital cameras

ЦФК	Объективы
Canon 70D	Canon 100 мм
	Canon 135 мм
	Canon 70–135 мм (зафиксирован на фокусном расстоянии 135 мм)
Nikon DF	Pentacoon Auto 135 мм
	Калейнар-5Н 100 мм
Hasselblad H4D-60	Hasselblad HC 100 мм
PhaseOne iXM-RS150F	PhaseOne 50 мм

3 Результаты

ЦФК Canon 70D

Паспортные данные: x_0 2736 pix; y_0 1824 pix; размер пикселя 0,0041 мм. Данные по откалиброванным объективам Canon 70D приведены в табл. 2.


Таблица 2 
Откалиброванные объективы
ЦФК Canon 70D
Table 2
Calibrated Canon 70D lenses

Параметры	Canon 100 мм	Canon 135 мм
σ_0	0,566 068	0,662 416
Focal length, pix (мм)	24 395,5 +/- 2,0 (100,022)	33 171,0 +/- 2,6 (136,001)
x_0 , pix	2697,8 +/- 5,6	2699,8 +/- 7,0
y_0 , pix	1823,3 +/- 7,8	1811,1 +/- 10,5
C1	1,2537E-10 +/- 2,985 925e-11	3,2879E-10 +/- 2,178 858e-11
C2	-6,0233E-18 +/- 2,792 432e-18	-4,6446E-18 +/- 1,825 534e-18
Количество снимков	48	115

В ходе калибровки объектива Canon 70–135 мм программа не может найти стабильное решение. Было проведено несколько съемок тест-объекта, но результат остался таким же. Откалибровать данный объектив стандартным методом на тест-объектах с малой пространственной глубиной также невозможно. Причина кроется во встроенной системе стабилизации изображения. Даже в отключенном состоянии она оказывает влияние на положение главной точки.

ЦФК Nikon DF

Паспортные данные: x_0 2464 pix; y_0 1640 pix; размер пикселя 0,0073 мм. Данные по откалиброванным объективам Nikon DF приведены в табл. 3.

Таблица 3 
Откалиброванные объективы
ЦФК Nikon DF
Table 3
Calibrated Nikon DF lenses

Параметры	Pentacon Auto 135 мм	Калейнар-5Н 100 мм
σ_0	0,523 478	0,343 744
Focal length, pix (мм)	18 848,7 +/- 1,4 (137,596)	13 740,6 +/- 0,6 (100,307)
x_0 , pix	2418,8 +/- 2,5	2474,9 +/- 1,0
y_0 , pix	1639,4 +/- 3,3	1668,8 +/- 1,4
C1	1,8717E-09 +/- 2,730 492e-11	2,0250E-09 +/- 1,583 858e-11
C2	-5,8095E-18 +/- 3,064 700e-18	-1,1394E-16 +/- 1,801 805e-18
Количество снимков	80	58

Hasselblad H4D-60 с объективом HC 100 мм

Паспортные данные: x_0 3354 pix; y_0 4478 pix; размер пикселя 0,0060 мм. Данная камера обладает матрицей размером 40,2×53,7 мм, по этой причине используемый объектив Hasselblad HC 100 мм попадает в категорию среднефокусных и может быть откалиброван стандартным методом с индивидуальными центрами проекции. Поскольку данная камера часто используется для аэрофотосъемки, было решено провести калибровку стандартным методом с индивидуальными центрами проекции и методом с общим центром проекции и сравнить результаты (табл. 4). Были также проведены обработка стереопары снимков с применением полученных параметров калибровки и оценка точности (табл. 5).

Таблица 4 ➔

Результаты калибровки Hasselblad H4D-60 с объективом HC 100 мм стандартным методом и методом с общим центром проекции

Table 4

Calibration results of Hasselblad H4D-60 HC 100mm by the standard method and the method with a common projection center

Параметры	Метод калибровки	
	Стандартный с индивидуальными центрами проекции	С общим центром проекции
Focal length, pix (мм)	16 663,8 +/- 2,3 (98,316)	16 656,4 +/- 1,4 (98,272)
xo, pix	3363,2 +/- 2,3	3360,7 +/- 2,4
yo, pix	4522,7 +/- 2,5	4532,3 +/- 1,9
C1	-1,8614E-10 +/- 9,878 049e-12	-2,0206E-10 +/- 9,939 447e-12
C2	-1,1706E-18 +/- 3,241 053e-19	-7,8066E-19 +/- 3,348 799e-19
Количество снимков	4	4

Таблица 5 ➔

Среднеквадратическая ошибка определения координат с использованием параметров калибровки, полученных стандартным методом и методом с общим центром проекции

Table 5

Root mean square error in determining coordinates using calibration parameters obtained by the standard method and the method with a common projection center

Координаты	СКО, мм	
	Стандартный метод	Метод с общим центром проекции
X	0,173	0,161
Y	0,216	0,114
Z	0,495	0,310

PhaseOne iXM-RS150F с объективом 50 мм

Паспортные данные: xo 7102 pix; yo 5326 pix; размер пикселя 0,003 76 мм.

Профессиональная камера для аэрофотосъемки. Размер матрицы 40,1x53,4 мм. Среднефокусная камера. Может быть откалибрована стандартным методом, но для сравнения также была проведена калибровка с общим центром проекции (табл. 6).

Таблица 6 ➔

Результаты калибровки PhaseOne iXM-RS150F с объективом 50 мм стандартным методом и методом с общим центром проекции

Table 6

Calibration results of PhaseOne iXM-RS150F 50 mm by the standard method and the method with a common projection center

Параметры	Метод калибровки	
	Стандартный с индивидуальными центрами проекции	С общим центром проекции
Sigma0	0,515 244	0,619 825
Focal length, pix (мм)	13 736,4 +/- 0,4 (51,649)	13 735,0 +/- 0,4 (51,644)
xo, pix	7101,4 +/- 0,2	7101,1 +/- 0,3
yo, pix	5355,1 +/- 0,4	5356,2 +/- 0,4
C1	-2,0369E-10 +/- 9,673 891e-13	-2,0373E-10 +/- 1,133 164e-12
C2	7,6815E-19 +/- 1,278 454e-20	7,6261E-19 +/- 1,487 752e-20
Количество снимков	6	6

4 Обсуждение

ЦФК Canon 70D

Результаты калибровки ЦФК с объективами Canon 100 мм и Canon 135 мм показывают, что данные объективы приемлемы для дальнейшего использования. Объектив Canon 70–135 мм непригоден для целей фотограмметрии из-за конструктивных особенностей (наличие стабилизатора, оказывающего влияние на элементы внутреннего ориентирования даже в отключенном состоянии).

В эксперименте с камерой Canon 70D вращение камеры осуществлялось так, чтобы в кадр попадало как можно большее количество точек. При такой съемке точки тест-объекта охватывают не всю площадь матрицы, следовательно, геометрические искажения определяются с меньшей точностью, чем могли бы. В дальнейших экспериментах это было учтено.

ЦФК Nikon DF

Результаты калибровки ЦФК с объективами Pentacon Auto 135 мм и Калейнар-5Н 100 мм показывают, что данные объективы приемлемы для дальнейшего использования. При выполнении съемки камерой Nikon DF камера вращалась таким образом, чтобы точки тест-объекта оказывались в разных частях снимка и при совместной обработке покрывали всю площадь матрицы. Это увеличило общее количество снимков, но повысило точность определения параметров калибровки.

Hasselblad H4D-60 с объективом HC 100 мм

Метод калибровки с общим центром проекции определил фокусное расстояние с чуть большей точностью, чем стандартный метод калибровки. При сравнении СКО по стереопаре снимков видно, что при обработке снимков с параметрами калибровки, полученными методом с общим центром проекции, точность по оси Z выросла в 1,5 раза.

PhaseOne iXM-RS150F с объективом 50 мм


Стандартный метод калибровки и метод калибровки с общим центром проекции показали практически идентичные результаты. Погрешность определения параметров калибровки при использовании метода с индивидуальными центрами проекции меньше, чем при калибровке методом с общим центром проекции, хоть и незначительно (сотые доли пикселя). Следует отметить, что данная камера подразумевает установку в стабилизирующую платформу и не имеет крепления под стандартный штатив. Для проведения съемки требуется использовать дополнительное внешнее крепление, что увеличивает погрешность определения положения центра проекции при установке камеры в панорамный штатив. В данном случае применение метода калибровки с общим центром проекции нецелесообразно.

5 Выводы

Метод калибровки с общим центром проекции позволяет калибровать ЦФК с длиннофокусными объективами на стандартных лабораторных тест-объектах с маркированными точками, что практически невозможно при калибровке стандартными методиками с индивидуальными центрами проекции. При вращении камеры необходимо охватывать всю рабочую площадь матрицы, а не стараться поймать в кадр как можно больше маркированных точек тест-объекта. В этом случае при совместной обработке снимков геометрические искажения будут описаны более точно, следовательно, точность определения параметров калибровки будет выше. Стоит избегать использования объективов с электронными стабилизаторами, так как даже в отключенном состоянии стабилизатор может оказывать влияние на положение главной точки на снимках при вращении камеры. Применение данного метода при калибровке ЦФК со среднефокусными объективами нецелесообразно.

БЛАГОДАРНОСТИ Автор выражает благодарность своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры фотограмметрии МИИГАиК Александру Валерьевичу Говорову, коллективу кафедры прикладной оптики МИИГАиК, ассистенту Елизавете Леонидовне Тарасовой, старшему преподавателю кафедры эпидемиологии и доказательной медицины Института общественного здоровья им. Ф.Ф. Эрисмана Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Артему Александровичу Позднякову за предоставленную фототехнику, а также своему дедушке, доктору геолого-минералогических наук, профессору Игорю Владимировичу Давиденко.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Тюфлин Ю.С. Фотограмметрия — вчера, сегодня и завтра // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2011. № 2. С. 3–8.
 2. Джарроуш Д. Цифровая камера как практический геодезический инструмент: проблемы и решения // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. Т. 1. № 2. С. 52–56. DOI:10.17273/CADGIS.2014.1.11.
 3. Бездидько С.Н. Ортогональные аберрации. Теория, методы и практика применения в вычислительной оптике // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 32–43.
 4. Бездидько С.Н. Методологические аспекты применения полиномов Цернике в вычислительной оптике // Фундаментальные основы инженерных наук: сборник трудов Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения нобелевского лауреата академика А.М. Прохорова. М.: ИРЭ РАН, Междунар. центр по информатике и электронной технике, 2006. Т. 1. С. 88–101.
 5. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Курков В.М. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.racurs.ru/www_download/articles/Camaras_digitales_rus.pdf (дата обращения: 10.09.2018).
 6. Гук А.П., Тихонов В.И., Белошапкин М.А. Исследование возможности применения неметрических цифровых снимков для обновления топографических карт // Сборник материалов Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006»: в 6 т. Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3. Ч. 1. С. 80–82.
 7. Cramer M. EuroSDR network on digital camera calibration // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul, 2004. Vol. 35. Part B6. P. 204–209.
 8. Cramer M., Przybilla H.-J., Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W6. P. 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w6-85-2017.
 9. Ergun B. Photogrammetric observing the variation of intrinsic parameters for zoom lenses // Scientific Research and Essays. 2010. Vol. 5. No. 5. P. 461–467.
 10. Chibunichev A.G., Govorov A.V., Chernyshev V.E. Research of the camera calibration using series of images with common center of projection // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W18. P. 19–22. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-19-2019.

АВТОР **Чернышев Василий Евгеньевич**
 ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
 (МИИГАиК), Москва, Россия
 кафедра фотограмметрии, геодезический факультет
 0009-0007-8643-799X

Поступила 01.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Geometric calibration of digital cameras with long focal length lenses using a series of images with a common center of projection

Vasily E. Chernyshev¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 kwikun@gmail.com

CITATION Chernyshev VE. Geometric calibration of digital cameras with long focal length lenses using a series of images with a common center of projection. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-012.

KEYWORDS calibration, digital camera, long focal length camera, center of projection, entrance pupil, optical system, photogrammetry

ABSTRACT The article presents the results of calibration of digital cameras equipped with a long-focus lens using a series of images with a common projection center. When calibrating cameras with a long-focus lens on standard test objects, the calibration parameters are determined with low accuracy, and in some cases, calibration is impossible. This is due to poor geometric parameters and conditions. Each picture includes a small number of marked points of the test object, the intersection angle is sharp, and the depth of field is insufficient (the difference in the position of the far and near points). Obviously, a special test object must be designed for long-focus calibration. We propose a different approach to the calibration process. The camera is mounted on a tripod with a panoramic head used by photographers to obtain spherical panoramas. The main condition for panoramic shooting is that the center of rotation of the camera and the projection center of the lens optical system must be at the same point. The article also presents a brief theory of central projection from the point of view of optics. The main misconceptions associated with the projection center and nodal points are described. The concepts of entrance and exit pupils of an optical system, as well as their roles in the optical system of a lens, are considered.

ACKNOWLEDGEMENTS The author would like to thank his scientific supervisor Alexander V. Govorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Photogrammetry, MIIGAiK; the team of the Department of Applied Optics, MIIGAiK; Elizaveta A. Tarasova, Assistant; Artem A. Pozdnyakov, the Senior Lecturer, Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine, F.F. Erisman Institute of Public Health, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, for providing photographic equipment; Igor V. Davidenko, author's grandfather, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor.

- REFERENCES**
1. Tyuflin YuS. Fotogrametrija – vchera, segodnja i zavtra [Photogrammetry – yesterday, today and tomorrow]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophptosurveying*. 2011;2: 3–8 (In Russian).
 2. Jarrovush D. Cifrovaja kamera kak prakticheskiy geodezicheskij instrument: problemy i reshenija [Digital camera as a practical geodetic tool: problems and solutions]. *CAD & GIS for roads*. 2014;1(2): 52–56. (In Russian). DOI:10.17273/CADGIS.2014.1.11.
 3. Bezdidko SN. Ortogonal'nye aberracii. Teorija, metody i praktika primenenija v vychislitel'noj optike [Orthogonal aberrations: theory, methods, and practical applications in computational optics]. *Opticheskii Zhurnal*. 2016;83(6): 32–43. (In Russian).
 4. Bezdidko SN. Metodologicheskie aspekty primenenija polinomov Cernike v vychislitel'noj optike [Methodological aspects of the application of Zernike polynomials in computational optics]. *Fundamental principles of engineering sciences: collection of articles of the International conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Nobel laureate academician A.M. Prokhorova*. Moscow: IRE RAS, International Center for Informatics and Electronic Engineering; 2006(1): 88–101. (In Russian).
 5. Mikhailov AP, Chibunichev AG, Kurkov VM. *Primenenie cifrovyh nemetriceskih kamer i lazernyh skanerov dlja reshenija zadach fotogrammetrii* [The use of digital non-metric cameras and laser scanners to solve photogrammetry problems]. (In Russian). Available from: http://www.racurs.ru/www_download/articles/Camaras_digitaes_rus.pdf (Accessed 10 September 2018).
 6. Guk AP, Tihonov VI, Beloshapkin MA. Issledovanie vozmozhnosti primenenija nemetriceskih cifrovyh snimkov dlja obnovenija topograficheskikh kart [Research on the possibility of using non-metric digital images to update topographic maps]. *Proceedings of the International scientific congress "GEO-Siberia-2006"*. In 6 vols. Vol. 3. Part 1. Novosibirsk: SSGA, 2006: 79–81. (In Russian).
 7. Cramer M. EuroSDR network on digital camera calibration. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Istanbul, 2004;35(B6): 204–209.
 8. Cramer M, Przybilla HJ, Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017(XLII-2/W6): 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w6-85-2017.
 9. Ergun B. Photogrammetric observing the variation of intrinsic parameters for zoom lenses. *Scientific Research and Essays*. 2010;5(5): 461–467.
 10. Chibunichev AG, Govorov AV, Chernyshev VE. Research of the camera calibration using series of images with common center of projection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;XLII-2/W18: 19–22. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-19-2019.

AUTHOR Vasily E. Chernyshev

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

 0009-0007-8643-799X

Submitted: November 01, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Криогенные формы рельефа массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай)

С.Н. Абдульмянов^{1,2}✉, Н.Н. Михайлов³

¹ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

² Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

³ Государственный университет управления, Москва, Россия

✉ abdulmyanov@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Абдульмянов С.Н., Михайлов Н.Н. Криогенные формы рельефа массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 46–68. DOI:10.30533/GiA-2025-013.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА спутниковые данные, цифровая модель рельефа, полевые методы исследований, геоморфологические особенности, криогенные формы рельефа, визуализация форм рельефа на картах, Монгольский Алтай

АННОТАЦИЯ Горные ландшафты, интерес к которым объединяет исследователей разных стран, сложны, сильно расчленены, фрагментарны и ставят перед специалистами сложные задачи визуализации данных о поверхности. Особенности Алтайской горной системы посвящено большое количество научных публикаций. Значимыми являются материалы комплексного описания территории Монгольского Алтая, собранные в экспедициях В.В. Сапожникова в 1905–1909 годах. По завершении полевых исследований в выводах и в картографическом произведении (карте) сведения о формах древнего и современного оледенения систематизированы и представлены в наглядном виде. В статье рассматриваются фрагмент изолированного массива Цэнгэл-Хайрхан с мало-мощным оледенением и троговая долина р. Хоромд-Булак, правого притока р. Харгантын-Гол (Караганты) бассейна р. Ховд (ранее Кобдо-Гол). По мере совершенствования методов изучения земной поверхности, накопления крупных массивов исследовательских данных, появления новых методик изображения рельефа поверхности возникают и новые возможности визуализации данных о местоположении и морфологических особенностях природных объектов. Вместе с тем значимость маршрутных наблюдений как основного метода непосредственного визуального восприятия, выявления важных особенностей

и характеристик исследуемого объекта велика. Без данных, поступающих с исследовательских маршрутов, проведения детального картирования объектов невозможно реализовать задачи изучения геоморфологических и ряда других особенностей горных территорий. В статье на основе использования спутниковых данных и новых методик визуализации выделены и изображены криогенные формы рельефа ледникового комплекса Цэнгэл-Хайрхан разного уровня и генезиса.

1 Введение

Гляциальные и мерзлотные формы рельефа, обусловленные в значительной степени экзогенными процессами, являются типичными для высокогорной зоны Монгольского Алтая. Объект, выбранный для рассмотрения, представляет собой изолированный массив с современным оледенением и репрезентативными криогенными формами рельефа.

Цель исследования — сбор актуальных полевых материалов об особенностях криогенных объектов территории Монгольского Алтая, дешифрирование, верификация и анализ спутниковых данных. В процессе исследования были определены следующие задачи:

- 1) провести полевой этап исследования, выбрать репрезентативный участок высокогорной зоны с яркими формами криогенного рельефа, собрать информацию об особенностях природных объектов;
- 2) обработать полевые материалы на основе использования возможностей ГИС, интерпретации спутниковых данных, визуализации данных цифровой модели высот (ЦМВ);
- 3) подготовить раздел каталога объектов, содержащий унифицированные иллюстрации геоморфологических особенностей территории, информацию, значимую для развития геотуризма.

2 Материалы и методы

2.1 Территориальные границы исследования

Массив Цэнгэл-Хайрхан (3943,8 м, также Ценгел Хаерхан, *англ.* Tsengel Khairkhan uul) расположен на северо-западе хребта с одноименным названием Цэнгэл-Хайрхан-Нуруу, на востоке от крупного пресноводного озера Хара-Нур (*англ.* Khar Nuur). Эта возвышенная территория Западной Монголии расположена в непосредственной близости от Джунгарской части Большого Алтая, находящегося в Китае. Территория, прилегающая к ледниковому массиву Алтай-Таван-Богд, была известна исследователям. Первые упоминания о ярких следах древнего оледенения в долинах р. Харгартын-Гол (у В.В. Сапожникова она обозначена как р. Караганты) есть в материалах экспедиции 1909 года¹. Детально изучалась территория и в советский период.

Массив сложной, изогнутой формы вытянут с северо-запада на юго-восток. Наиболее высокая часть хребта расположена на северо-западе и носит название *Нортын-Нуруу*. С севера горные сооружения Цэнгэл-Хайрхан-Нуруу продолжают хребтом Тэшир-Хэрбейн-Нуру (2600–2900 м). С запада и юго-запада

¹ Сапожников В.В. Монгольский Алтай в истоках Иртыша и Кобдо: путешествия 1905–1909 гг. Томск: Типо-литография Сибирского Т-ва печатного дела, 1911. С. 235–238.

Рис. 1 

Цифровая модель поверхности северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Дополнительно цветом выделены высоты. На основе интерпретации данных FABDEM V1-2, 2021. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 12 000 (б)

Fig. 1

Digital model of the terrain of the northern macroslope of the Tsengel Khaikhan uul. Additionally, the heights are highlighted in colors. Based on the interpretation of the FABDEM V1-2 data, 2021. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 12 000 (b)

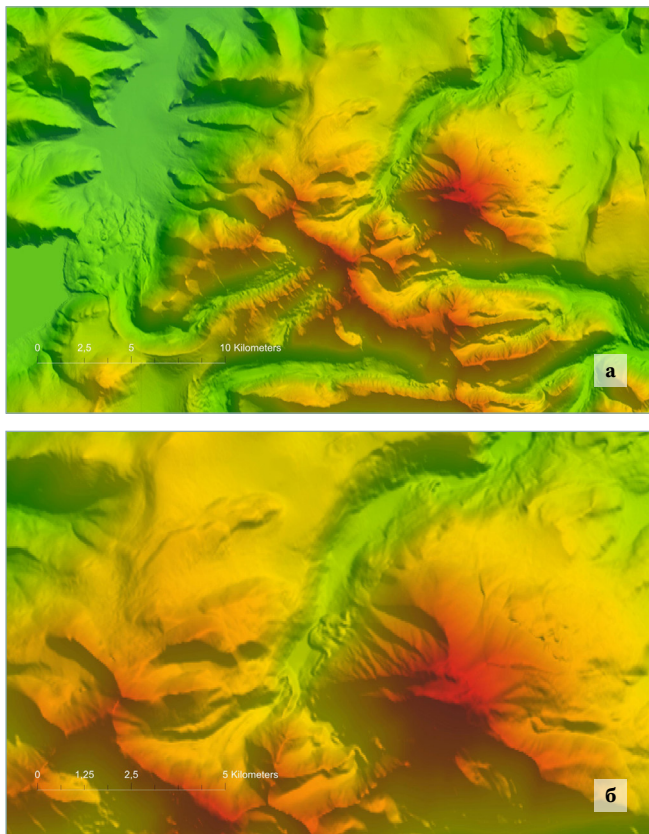
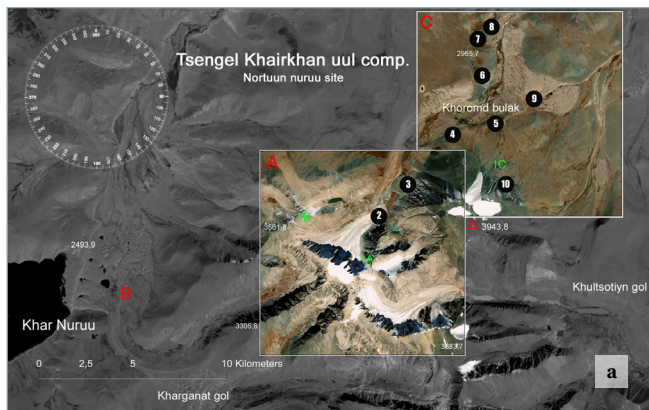


Рис. 2 

Справочная карта северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Выделены сектора А и С, основные объекты, высоты. Базовый снимок. Landsat 9 OLI_TIRS, “2022-08-29. 04:54:58.3812950Z”. ID: LC09_L1TP_143026_20220829_20230331_02_T1. USGS. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 9 000 (б)

Fig. 2

Reference map of the northern macroslope of the Tsengel Khaikhan uul massif. Sectors A and C, main objects, and heights are highlighted. Base image. Landsat 9 OLI_TIRS, “2022-08-29. 04:54:58.3812950Z”. ID: LC09_L1TP_143026_20220829_20230331_02_T1. USGS. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 9 000 (b)

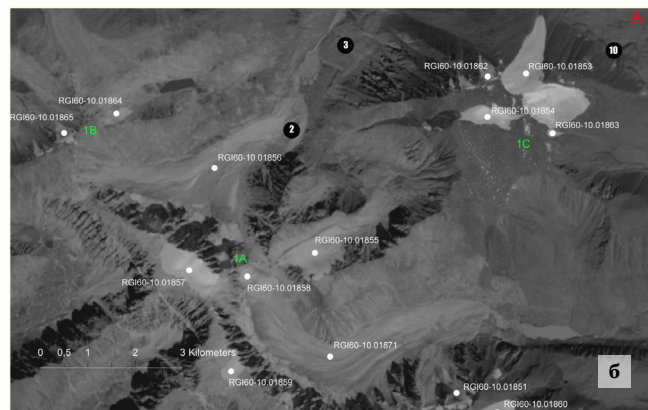


массив ограничивают бессточная котловина оз. Хар-Нуур (урез воды 2493,9 м, высота по топографической карте) и впадина Хара-Борэг (с высотами 2200–2400 м). Восточной границей массива является долина р. Сагсай-Гол (2000–2200 м). Самая южная часть хребта Цэнгэл-Хайрхан-Нуруу оканчивается у самой границы у массива Увчун-Ула (3575 м) и озера Хуримп-Нуур^{2,3,4}.

Массив дренируется р. Харганын-Гол, Цаган-Асгын-Гол, Джелтын-Гол и Хулцотийн-Гол (*англ.* Khargantyn gol, Tsagan Asgyn gol, Djeltyun gol, Khultsotiyn gol). Западный макросклон массива Цэнгэл-Хайрхан, где расположены объекты исследования, относится к долине р. Хоромд-Булак (*англ.* Khoromd-Bulak), левому ее притоку р. Модин-Сала (*англ.* Modin Sala gol), правому притоку р. Харганын-Гол. Все водотоки относятся к бассейну р. Ховд (ранее Кобдо-Гол). С запада, юго-запада и юга от массива находятся крупные пресноводные озера возвышенной части Монгольского Алтая — Хурган-Нуур, Хотон-Нуур и Даян-Нуур (у В.В. Сапожникова они обозначены как Верхнее и Нижнее Кобдосские озера, Даян-Гол; *англ.* Khurgan Nuur, Khotoon Nuur, Dayan Nuur). С востока от массива расположено крупное озеро Толбо-Нуур (*англ.* Tolbo Nuur). Это существенно влияет на морфологию и динамику современных ледников, региональные климатические особенности [1]. Цифровая модель поверхности северного макросклона Цэнгэл-Хайрхан и справочная карта территории исследования представлены на рис. 1–2.

По результатам последних инструментальных исследований приводятся следующие характеристики для озера Хар-Нуур: высота (GNSS) — 2488 м (2016), 2487 м (2010), 2486 м (2006) над уровнем моря;

- 1 Цифровая модель поверхности северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 12 000 (б).
- 2 Карта Монгольского Алтая в истоках Иртыша и Кобдо: по маршрутам экспедиций профессора В.В. Сапожникова 1905–1909 гг. / сост. на основании оригинальной съемки и др. материалов В.В. Обручевым; чертил Д. Ильин. Масштаб 1 : 840 000, 20 верст в англ. дюйме. Лейпциг: А. Брокгауз, 1911.
- 3 Топографическая карта. Масштаб 1 : 1 000 000. М.: ГШ ВС СССР, 1982. Л. М-45-119, М-45-130, М-45-131.
- 4 Топографическая карта. Масштаб 1 : 2 000 000. М.: ГШ ВС СССР, 1982. Л. М-45-30, М-45-36.



площадь водосбора — 44,8 км², площадь водной поверхности — 13,9 км² (2006), 13,8 км² (2010), 13,5 км² (2016). Максимальная глубина озера, согласно результатам измерений, проведенных с помощью эхолота (2016), составляет 58 м, средняя — 28 м [2].

В отличие от крупных ледниковых комплексов Монгольского Алтая (Алтай-Таван-Богд, Цамбагарав, Сутай и ряда других), площадь современного оледенения данного массива совсем невелика и размеры ледников миниатюрные (до 1,523 км²)⁵. Тем не менее рассматриваемая территория обладает набором значимых природных объектов и в достаточной степени привлекательна в силу незначительного размера криогенных объектов, климатических условий, отсутствия лесной растительности, малой удаленности от населенных пунктов, хорошей транспортной доступности. В табл. 1^{6,7} [3] представлены данные по современному оледенению массива Цэнгэл-Хайрхан.

Таблица 1 

Современное оледенение массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай)

Table 1

Modern glaciation of the Tsengel Khairkhan uul (Mongolian Altai)

Примечание.

RGI 6 20110823 — Randolph 6 Glacier Inventory 20110823.

Номер ледника RGI 6 20110823	Площадь, км ²	Высота, м		
		минимальная	средняя	максимальная
RGI60-10.01856	1,523	2951	3166	3799
RGI60-10.01871	1,009	3009	3248	3588
RGI60-10.01855	0,487	3085	3365	3552
RGI60-10.01853	0,403	3250	3691	3900
RGI60-10.01877	0,376	3088	3245	3473
RGI60-10.01872	0,326	3149	3277	3474
RGI60-10.01852	0,305	3157	3283	3538
RGI60-10.01851	0,260	3372	3538	3682
RGI60-10.01857	0,252	3656	3742	3796
RGI60-10.01860	0,246	3114	3416	3617
RGI60-10.01880	0,190	3247	3409	3491
RGI60-10.01879	0,186	3293	3444	3538
RGI60-10.01854	0,167	3845	3900	3920
RGI60-10.01861	0,166	3149	3424	3585
RGI60-10.01859	0,136	3653	3693	3709
RGI60-10.01858	0,133	3360	3451	3583
RGI60-10.01887	0,106	3228	3384	3462
	6,138			
RGI60-10.01878	0,099	3026	3225	3402
RGI60-10.01864	0,075	3301	3386	3496
RGI60-10.01863	0,068	3495	3554	3624
RGI60-10.01870	0,056	3150	3205	3240
RGI60-10.01865	0,047	3417	3543	3612
RGI60-10.01868	0,047	3432	3575	3630
RGI60-10.01867	0,044	3265	3333	3387
RGI60-10.01862	0,043	3682	3779	3858
RGI60-10.01869	0,04-	3437	3534	3595
RGI60-10.01889	0,032	3269	3315	3377
RGI60-10.01890	0,032	3306	3370	3430
	0,583			
Всего	6,721			

- 5 Windnagel A. A Summary of the Global Glacier Landscape: The Largest Glaciers and Glacier Complexes in the 19 Glacial Regions of the World. NSIDC Special Report 23. Boulder CO, USA: National Snow and Ice Data Center, 2022. 73 p.
- 6 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS). Monitoring the World's Changing Glaciers, GLIMS Glacier Viewer. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.glims.org/maps/glims> (дата обращения: 20.10.2024).
- 7 Использованы данные каталогов ледников RGI v6, версия 2011.

Рис. 3

Справочная карта современного оледенения северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Нумерация согласно каталогу RGI v6. Базовый снимок. Landsat 8 OLI_TIRS от 2022-08-29, USGS. Псевдоцвета. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 9 000 (б)

Fig. 3

Reference map of modern glaciation of the northern macroslope of the Tsengel Khairkhan uul. Numbering according to the RGI v6 catalog. Base image. Landsat 8 OLI_TIRS from 2022-08-29, USGS. The infrared channel B8-PAN (NIR) and pseudo colors. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 9 000 (b)

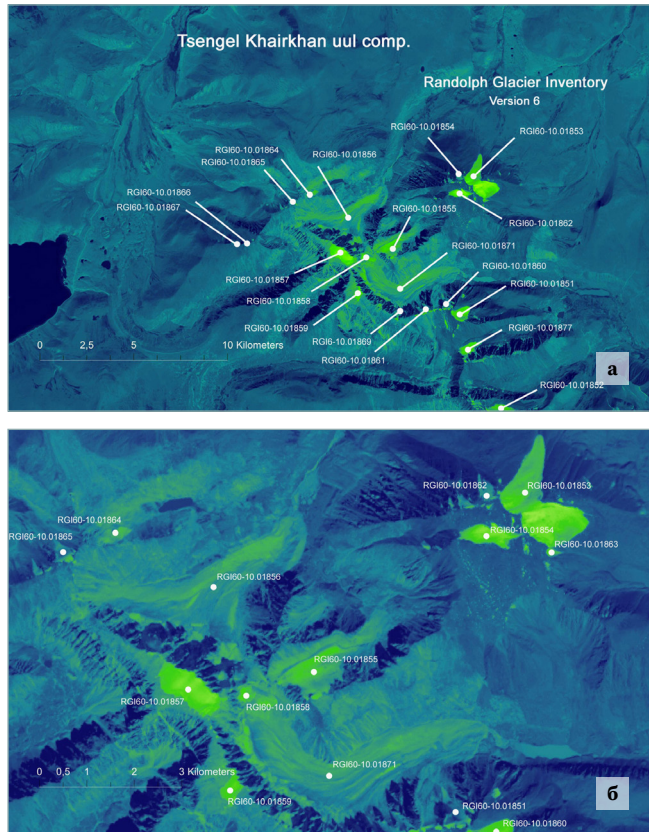
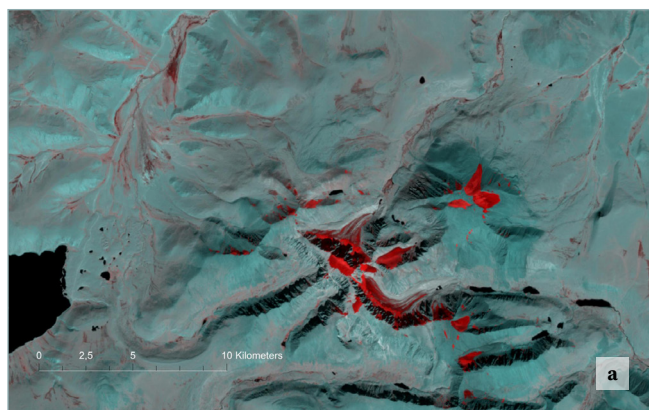


Рис. 4

Справочная карта современного оледенения северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Базовый снимок – Sentinel-2A от 2016-09-06, ЕСА. Для визуализации данных использованы комбинация каналов инфракрасного и видимого диапазона B12-B8A-B4 (SWIR-1, NIR-2, Red) и псевдоцвета. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 9 000 (б)

Fig. 4

Reference map of modern glaciation of the northern macroslope of the Tsengel Khairkhan uul and sector A. Base image – Sentinel-2A from 2016-09-06, ESA. For data visualization, a combination of infrared and visible range channels B12-B8A-B4 (SWIR-1, NIR-2, Red) and pseudocolors. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 9 000 (b)



Справочная карта современного оледенения северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан приводится на рис. 3–4.

На западе и юге от объекта расположена охраняемая территория – национальный парк Алтай-Таван-Богд с крупнейшим центром оледенения Северной Азии. Административно территория относится к сомонам Баян-Улгийского аймака Улаанхус, Сагсай.

2.2 Объекты и методы исследования

В отличие от полярных территорий, горных стран высоких широт, криогенные формы данной части Большого Алтая имеют меньшие размеры и фрагментарное распространение. Высокогорный район Монгольского Алтая отличается повсеместным распространением многолетней мерзлоты, существованием специфических мерзлотных форм рельефа горных склонов и долин, глубоким промерзанием грунтов, редкими фрагментами реликтовой мерзлоты, отсутствием речного стока большую часть года, наледями на реках, экстремальными экологическими особенностями природной среды, суровыми условиями жизни населения. Выделенные далее криогенные формы обладают характерными морфологическими особенностями поверхности.

При подготовке материала были использованы следующие **методы**: информационно-картографический, дистанционного зондирования и полевых наблюдений.

Полевой этап проходил в два периода: сбор полевого материала в сентябре 2022 года и в августе 2024 года. Короткая рекогносцировочная поездка состоялась также в январе 2024 года. Метод включал прохождение пеших маршрутов, сбор первичных данных, выделение ключевых участков поверхности, фотофиксацию объектов.

Верификация данных с полевых маршрутов проходила с использованием материалов дистанционного зондирования Земли и возможностей ГИС-приложений. При подготовке карт использовались

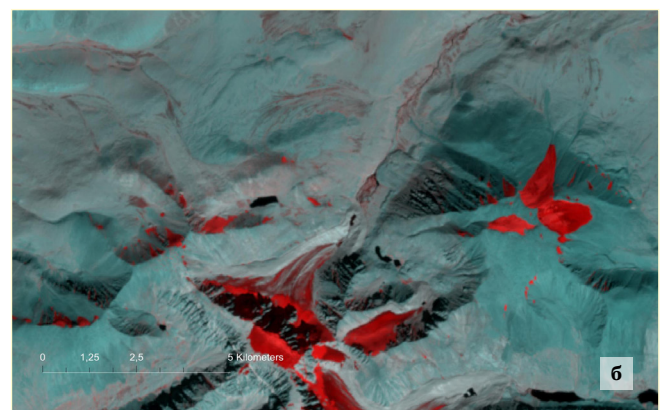


Рис. 5 

Сектор А. Вид на крупные каменные потоки (участок 3) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Базовое изображение – World Imagery (Clarity), Esri, версия 2024 г. Масштаб 1 : 2 800 (а) – 1 : 1 200 (б)

Fig. 5

Sector A. View of the slope large rock streams (site 3), Tsengel Khairkhan uul complex. Base image – World Imagery (Clarity), Esri, version 2024. Scale 1 : 2 800 (a) – 1 : 1 200 (б)

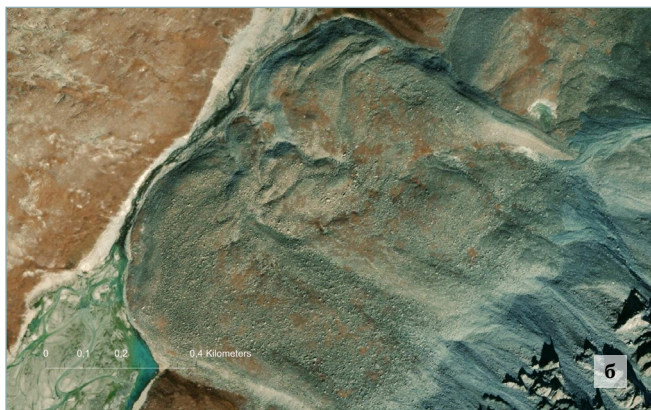
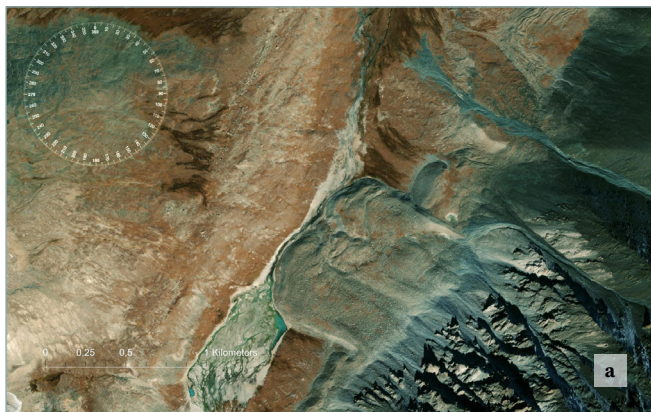
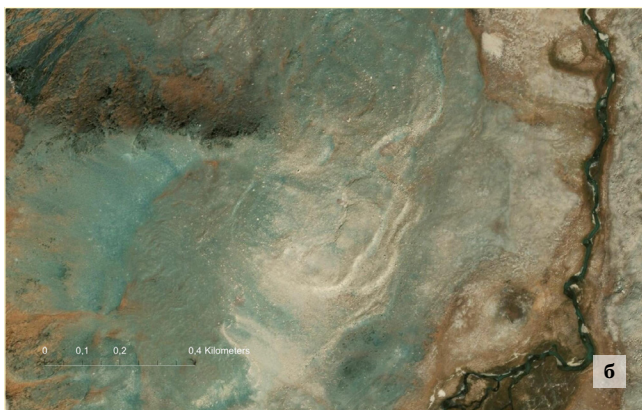
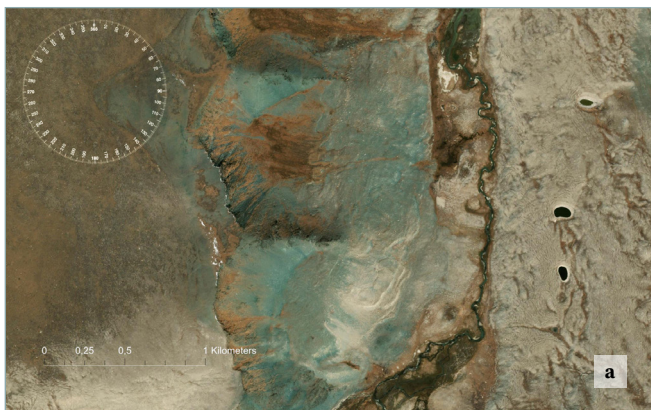


Рис. 6 

Сектор С. Вид на солифлюкционные потоки склона восточной экспозиции (участки 6, 7), долины р. Хоромд-Булак. Базовое изображение – World Imagery (Clarity), Esri, версия 2024 г. Масштаб 1 : 2 800 (а) – 1 : 1 200 (б)

Fig. 6

Sector C. View of solifluction flows of the eastern slope (sites 6, 7), Khoromd-Bulak river valley. Base image – World Imagery (Clarity), Esri, version 2024. Scale 1 : 2 800 (a) – 1 : 1 200 (б).



открытые данные о высотных характеристиках поверхности Земли, полученные с помощью радарной съемки SRTM, ALOS GDEM, NASAGEM, FABDEM, серия многозональных снимков USGS (*англ.* United States Geological Survey – Геологическая служба США) Landsat MS 8 и 9, обновляемые спутниковые мозаики World Imagery, ESRI. При анализе характеристик ледниковых комплексов использовались данные специализированных каталогов Randolph Glacier Inventory (RGI) и GLIMS Glacier Database.

Объектами исследований стали формы ледникового рельефа, обусловленные геологической деятельностью ледников, и формы криогенного (мерзлотного) рельефа, связанные с широким распространением льда в рыхлых отложениях в высокогорном поясе. Объекты криогенного генезиса представлены различными формами рельефа, снежно-ледяными, каменно-ледяными образованиями (каменными глетчерами, каменными потоками), солифлюкционными формами, участками с буграми пучения, полигональными и структурными грунтами и др.

Характеристикам и особенностям объектов северо-западной части Монгольского Алтая посвящено множество научных работ^{8,9,10} [4–6]. Территория, где расположены массив Цэнгэл-Хайрхан и прилегающие долины, разделена нами на сектора, которые на карте обозначены буквами латинского алфавита **A, B, C, D, E, F**. Районы проведения работ на северо-восточном склоне (сектора **A** и **C**) разделены на две зоны, выделено 9 участков. Формы криогенного рельефа разделены на 6 групп. Изображение объектов и выделенные сектора приводятся на рис. 5–8.

- 8 Геокриологические условия Монгольской Народной Республики: монография / отв. ред. П.И. Мельников. М.: Наука, 1974. 208 с.
- 9 Ревякин В.С. Природные льды Алтае-Саянской горной области (внутриконтинентальный вариант гляциосферы Земли). Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 288 с.
- 10 Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Основные понятия и определения: иллюстрированный энциклопедический справочник. М.: Научный мир, 2007. 312 с.

Рис. 7 

Виды на сектора: В — восточное побережье озера Хар-Нуур; Е, D — долины р. Харгалант-Гол, Хулцотийн-Гол, конечная морена позднеплейстоценового комплекса; С — формы мерзлотного рельефа долины р. Хоромд-Булак. Базовый снимок. Landsat 8 OLI_TIRS от 2022-08-29, USGS (слева). Акцент — крутизна склонов. Изображение на основе снимка Landsat и комбинированного метода визуализации данных RRIM. Масштаб 1 : 9 000 (справа)

Fig. 7
Views of sectors: В - the eastern coast of Lake Khar Nuur; Е, D - the valleys of the Khargalant gol and Khultsotiin gol rivers - terminal moraine of the late Pleistocene complex; С - permafrost relief forms of the Khoromd-Bulak river valley. Base image. Landsat 8 OLI_TIRS from 2022-08-29, USGS (on the left). Emphasis on the steepness of the slopes. Image based on Landsat image and RRIM® combined method of visualizing data. Scale 1 : 9 000 (on the right)

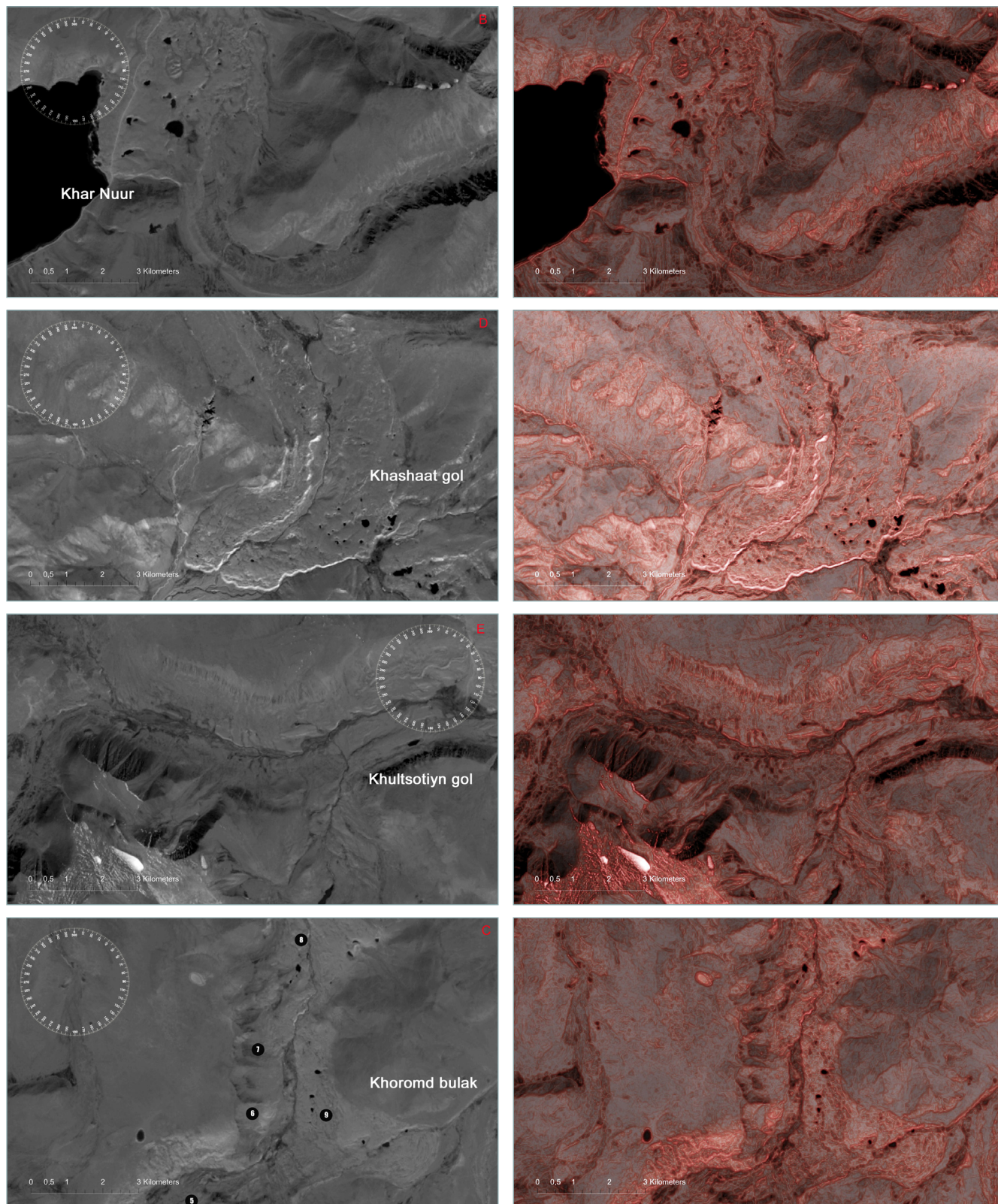
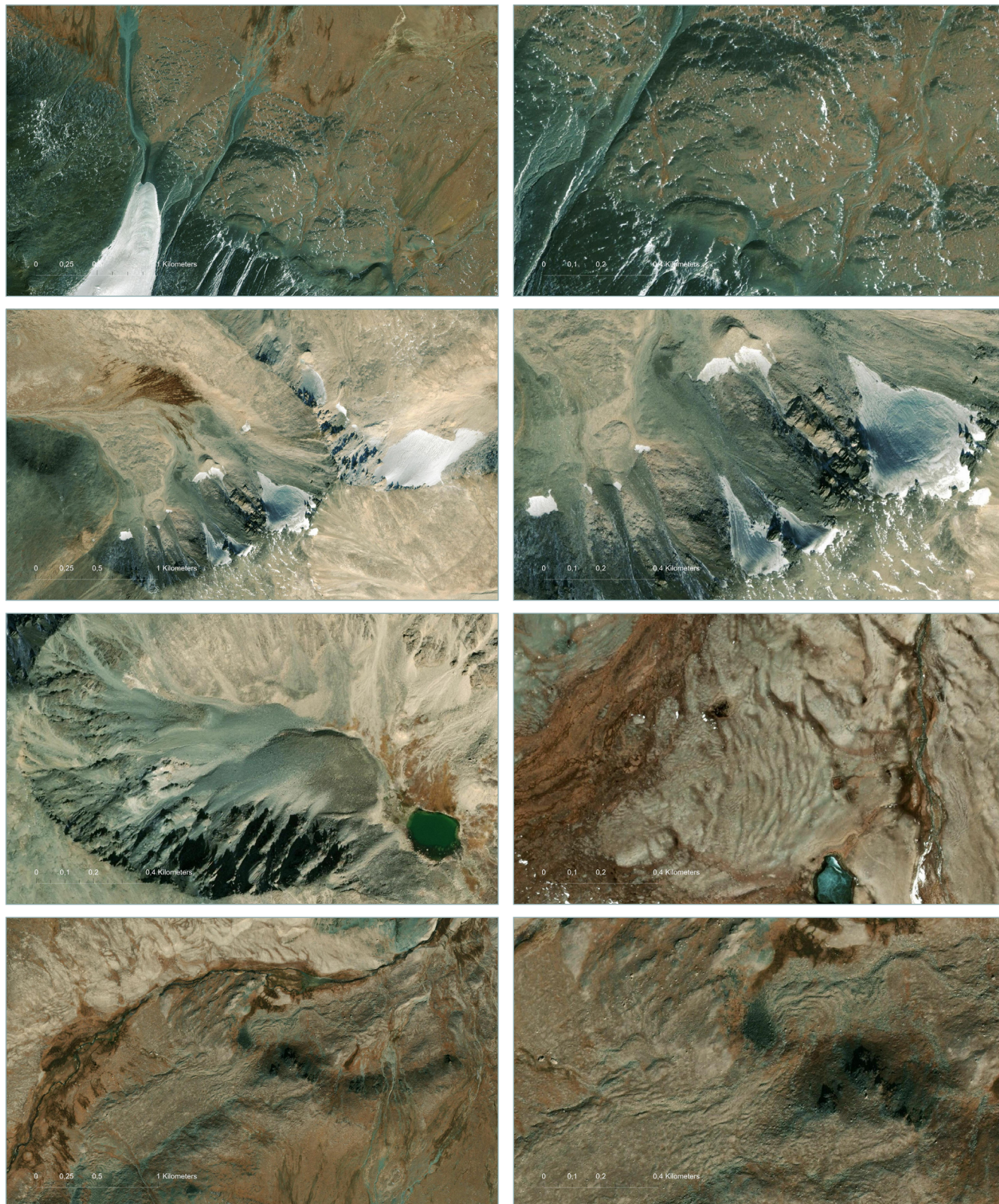


Рис. 8 

Вид на сектора А и С ледникового комплекса Цэнгэл-Хайрхан и долины р. Хоромд-Булак. Серия изображений – мелкие формы гляциального и мерзлотного рельефа (участки 4–9). Базовое изображение – World Imagery (Clarity), версия 2024 г. Масштаб 1 : 2 800 – 1 : 1 200

Fig. 8

View of sectors A and C of the Tsengel Khairkhan uul glacier complex and the Khoromd-Bulak river valley. A series of images – small forms of glacial and permafrost relief (sites 4–9). Base image – World Imagery (Clarity), Esri, version 2024. Scale 1 : 2 800 – 1 : 1 200



2.3 Источники пространственных данных

1. Для анализа состояния поверхности участка в качестве основного источника применялись многозональные снимки среднего разрешения оптического диапазона USGS Landsat 8 OLI_TIRS, Landsat 8 и 9 OLI_TIRS за 10-летний период (с 31 августа 2014 года по 27 августа 2024 года)¹¹. Для создания изображений использован восьмой спектральный канал B8 PAN (OLI), панхроматический (*англ.* panchromatic, PAN) — длина волны 0,503–0,676 мкм, разрешение 15 м/пиксель. В качестве дополнительных применялись каналы B2 (Blue) — длина волны 0,452–0,512 мкм; B5 (Near-Infrared, NIR) — 0,851–879 мкм; B6 (Short Wavelength Infrared, SWIR 1) — 1566–1651 мкм. Кроме того, при создании композитов использована серия многозональных снимков среднего разрешения оптического диапазона ESA — Sentinel-2A¹² MSI. Базовый снимок — Sentinel-2A “L1C_T45UXP_A006308_20160906T05652 2023-10-23T01:58:25.000000Z”. Лучшие результаты для представления данных о современном оледенении были получены при использовании комбинации каналов инфракрасного и оптического диапазонов: B12 (Short Wave Infrared, SWIR-2) — длина волны 2,081–2,323 мкм; B8A (Narrow Near Infrared, NIR-2) — 0,848–0,883 мкм; B4 (Red) — 0,645–0,683 мкм. Разрешение выбранных каналов — 20–10 м/пиксель.
2. Для анализа состояния поверхности участка были использованы подготовленные на основе доступных радарных данных цифровые модели рельефа (ЦМР). Были проанализированы доступные данные ЦМВ: The NASA Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM Version 4 (SRTM 30m, 2008)¹³; ALOS Global Digital Surface Model (DSM), ALOS World 3D-30m (AW3D30), Version 4,0 (2023)¹⁴; NASADEM Merged DEM Global 1 Arc Second V001 (2020)¹⁵ — и их последующие интерпретации. Данные ЦМВ ALOS на Монголию были подготовлены компанией NextGIS¹⁶. Были также использованы высотные данные, входящие в комплект многозональных снимков Landsat 9 OLI_TIRS. Лучшие результаты были получены при применении цифровой модели поверхности (ЦМП) DTM FABDEM 30m, V1-2¹⁷ [7, 8].
3. В качестве дополнительного источника данных использовались спутниковые мозаики World Imagery, World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), данные о гидросети HydroSHEDS (*англ.* Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales)¹⁸, ArcGIS Living Atlas¹⁹ (Esri Inc.).

Материалы подготовлены в системе Geographic Coordinate System (GCS Datum): World Geodetic System, WGS 1984 (EPSG: 4326) в конической картографической проекции (World Equidistant Conic), оптимальной для Большого Алтая. Центральный меридиан: 90,0. Масштаб 1 : 55 000 – 1 : 2 000.

-
- 11 Earth Resources Observation and Science Center (EROS). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 07.05.2024).
 - 12 Sentinel Online / Copernicus Open Access Hub. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spacedata.copernicus.eu> (дата обращения: 20.02.2022).
 - 13 Consortium for Spatial Information of the Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR-CSI). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 07.02.2024).
 - 14 ALOS Science Project. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earth.jaxa.jp/en/research/projects/alos/index.html> (дата обращения: 05.01.2024).
 - 15 NASADEM Merged DEM Global 1 Arc Second V001. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001 (дата обращения: 30.04.2024).
 - 16 NextGIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nextgis.ru/datasets> (дата обращения: 30.04.2024).
 - 17 FABDEM V1-2 / The University of Bristol Research Data Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn> (дата обращения: 05.01.2024).
 - 18 HydroSHEDS / World Wildlife Fund US. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hydrosheds.org> (дата обращения: 25.05.2021).
 - 19 ArcGIS Living Atlas of the World / Esri Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://livingatlas.arcgis.com/en/> (дата обращения: 20.04.2024).

2.4 Визуализация данных

Порядок работ по визуализации данных представлен ниже.

1. Анализ и выбор сцен (снимков) из серии многозональных снимков среднего разрешения оптического диапазона Landsat 8 и 9 OLI_TIRS и Sentinel-2A. В качестве базовых при составлении карт были выбраны снимки летнего периода с наименьшей площадью оледенения массива.
2. Анализ и выбор файлов ЦМБ (HDR/HGT – SRTM и GeoTIFF – ALOS GDEM, NASADEM, DTM FABDEM) в Global Mapper v21.00 и ArcGIS Desktop.
3. Визуализация геоморфологических показателей территории. Визуализировался один показатель — крутизна склонов (углы). Данные ЦМБ, снимков Landsat, спутниковых мозаик обрабатывались с помощью инструментов ArcGIS Spatial Analyst Tools (Esri Inc.). Для отображения мерзлотных склонов использованы алгоритм математической обработки данных Quantile и 25 классов градиентной шкалы. Для карт поверхности крутизны склонов масштабов 1 : 55 000 – 1 : 9 000 применялись данные ЦМБ (ALOS GDEM и DTM FABDEM), панспектральный канал (PAN-8) спутниковых снимков. Для карт поверхности склонов масштабов 1 : 9 000 – 1 : 1 200 в отсутствие лидарных данных использовались данные спутниковых мозаик World Imagery ESRI. Использование изобразительных методов для создания реалистичной модели поверхности и форм рельефа имеет давнюю историю. Имитация различных методов освещения объектов, поглощения солнечных лучей поверхностью, отражения и переотражения света от объектов, появление световых эффектов и оптических иллюзий — это арсенал средств, используемых в работе художниками, дизайнерами и инженерами. В отличие от изображений, создаваемых вручную, современные методы работы, в том числе и картография, требуют от специалистов технической грамотности, знания возможностей конкретных приложений. Создание креативных картографических изображений, подчеркивающих особенности поверхности объектов, также предполагает знание теории цвета, цветовых созвучий, правил композиции, владение другими художественными приемами^{20,21}. Примером реализации масштабного национального проекта по визуализации особенностей горной территории является Атлас Швейцарии²².
4. В целях лучшего представления данных об особенностях земной поверхности, форм современного и древнего оледенения использованы возможности ИК-диапазона, псевдоцвета и современные методики создания изображений [9, 10]. При подготовке картографических изображений ледников массива использована методика создания подсвеченных объектов (*англ.* Illumination Cartography)²³. При подготовке изображений поверхности, показывающих мерзлотные склоны, применялся комбинированный метод RRIM (*англ.* Red Relief Image Map). Он использовался для визуализации данных ЦМП, отдельных каналов спутниковых снимков и спутниковых мозаик на их основе [11, 12]. В качестве основного инструмента применялись возможности ГИС ArcGIS Desktop v10.3.0 (ESRI Inc.), Global Mapper v21.00²⁴ и Google Planet Earth Pro²⁵.

20 Иттен И. Искусство цвета / пер. с нем. М.: Д. Аронов, 2000. 96 с.

21 Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие / пер. с англ. М.: Архитектура-С, 2007. 392 с.

22 Atlas of Switzerland. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.atladerschweiz.ch/portfolio/> (дата обращения: 05.12.2023).

23 Nelson J.M. Illumination Cartography. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://adventuresinmapping.com/2024/04/08/illumination-cartography> (дата обращения: 25.10.2024).

24 Global Mapper / Blue Marble Geographics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php> (дата обращения: 20.04.2024).

25 Google Planet Earth Pro / Google Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.com/earth> (дата обращения: 05.12.2023).

Дополнительным источником стали данные топографических карт Генерального штаба ВС СССР и карт Госгисцентра РФ (листы М-45-30, М-45-36, масштаб 1 : 200 000; листы М-45-119, М-45-130, М-45-131, масштаб 1 : 100 000).

В результате на северо-восточный склон массива Цэнгэл-Хайрхан подготовлены ГИС-проект и серия изображений участков с формами криогенного рельефа.

3 Результаты

Криогенные формы рельефа северо-восточного склона массива Цэнгэл-Хайрхан и долины р. Хоромд-Булак представлены объектами разного генезиса и высотного уровня, классифицированы и указаны в табл. 2. Созданные в результате интерпретации спутниковых данных картографические изображения территории исследования, выделенных участков, фотографии объектов с полевых маршрутов приведены далее.


Таблица 2 
Криогенные объекты массива Цэнгэл-Хайрхан и долины р. Хоромд-Булак (Монгольский Алтай)

Table 2
Cryogenic objects of the Tsengel Khairkhan uul and the river valley Khoromd-Bulak, Mongolian Altai

Примечание. Обозначения СВ, СЗ, С, В указывают на экспозицию склонов.

Категории и виды объектов, участки А и С	Склон	Координаты, °	
Формы, связанные с современным оледенением			
1А, RGI60-10.01856. Зона ледопада, снежных лавин	СВ	48,632009	89,104735
1А, RGI60-10.01856. Конечная морена (2)	В	48,643090	89,101959
1В, RGI60-10.01865. Группа миниатюрных ледников	СЗ	48,646952	89,070870
1С, RGI60-10.01853. Висячий ледник	СВ	48,657284	89,159113
1С, Группа миниатюрных селей и осыпей (10)	СЗ	48,659515	89,170345
Крупные каменные потоки (3), правый борт	СЗ	48,658717	89,123033
Формы, связанные с подземным оледенением (ММ)			
Солифлюкционный поток, правый борт (4)	СВ	48,679034	89,150325
Солифлюкционные потоки, правый борт (5)	С	48,675542	89,149976
Солифлюкционные склоны, высота 2962,4 м (6)	В	48,692673	89,164659
Солифлюкционные склоны (7)	В	48,702532	89,163682
Солифлюкционные валы или гряды (8)	СВ	48,719014	89,170155
Термокарстовые воронки (правый борт долины) (9)	СЗ	48,689421	89,175888
Термокарстовые котловины в средней части долины	С	48,699602	89,177696

3.1 Современное оледенение

Граница самого крупного современного гляциального комплекса массива Цэнгэл-Хайрхан долинного ледника (RGI60-10.01856) соотносится с долиной р. Хоромд-Булак, хорошо выражена в современном рельефе, маркируется высоким моренным валом, подпрудным озером, снежниками, крупными каменными потоками и другими миниатюрными объектами, расположенными в долине (1А). Координаты: 48,646145° / 89,113529°. Высота 2970 м, превышения до 50 м.

К формам современного оледенения относятся элементы ледниковой поверхности, формы, характерные для фирновой зоны и зоны абляции ледников. Данные особенности горных склонов хорошо известны альпинистам и горным туристам, от прохождения таких участков зависят степень риска, квалификация, требования к снаряжению и категорийность пеших маршрутов. Сюда можно отнести видимые фрагменты фирновой зоны, места схода снежных

лавины, участки перегибов ледникового тела (ледопады, крутые ледниковые склоны северной и северо-восточной экспозиции), исключительно опасные для передвижения.

Фотографии высокогорной зоны, опасные для передвижения участки склонов ледникового комплекса (RGI60-10.01856), высокого моренного вала, самого крупного ледника комплекса представлены на рис. 9–10.

Для контраста необходимо выделение группы из миниатюрных висячих ледников на склоне северо-западной экспозиции (**1B**). Координаты (RGI60-10.01865): $48,646952^\circ / 89,070870^\circ$. Высота 3565 м.

Второй по размерам и четвертый в массиве современного гляциального комплекса Цэнгэл-Хайрхан висячий ледник (RGI60-10.01853) площадью $0,403 \text{ км}^2$ также соотносится с долиной р. Хоромд-Булак. Граница его менее выражена в современном рельефе, маркируется группой эрратических валунов на фронте и другими миниатюрными объектами криогенного генезиса, расположенными вниз по склону (**1C**). Координаты: $48,678976^\circ / 89,149965^\circ$. Высота 2800 м. С ним соотносится группа миниатюрных селей и осыпей на склоне северо-западной экспозиции (**10**). Координаты: $48,659515^\circ / 89,170345^\circ$. Высота 3225 м.

Фотографии висячего ледника и криогенных объектов на фронте (конечная морена, каменные потоки и мелкие формы криогенного рельефа, группы эрратических валунов) представлены на рис. 11.

Рис. 9

Вид на зону абляции ледника (RGI60-10.01856) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Зона ледопада и схода снежных лавин. Склон северо-восточной экспозиции. Сектор А, участки 1А, 1, 2.
Снимки 2024.08.16. 08.23.15 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5 +

Fig. 9

View of the glacier ablation zone (RGI60-10.01856) of the Tsengel Khairkhan uul complex. Icefall and avalanche zone. Slope of north-eastern exposure. Sector A, sites 1A, 1, 2.
Photos 2024.08.16. 08.23.15 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5+

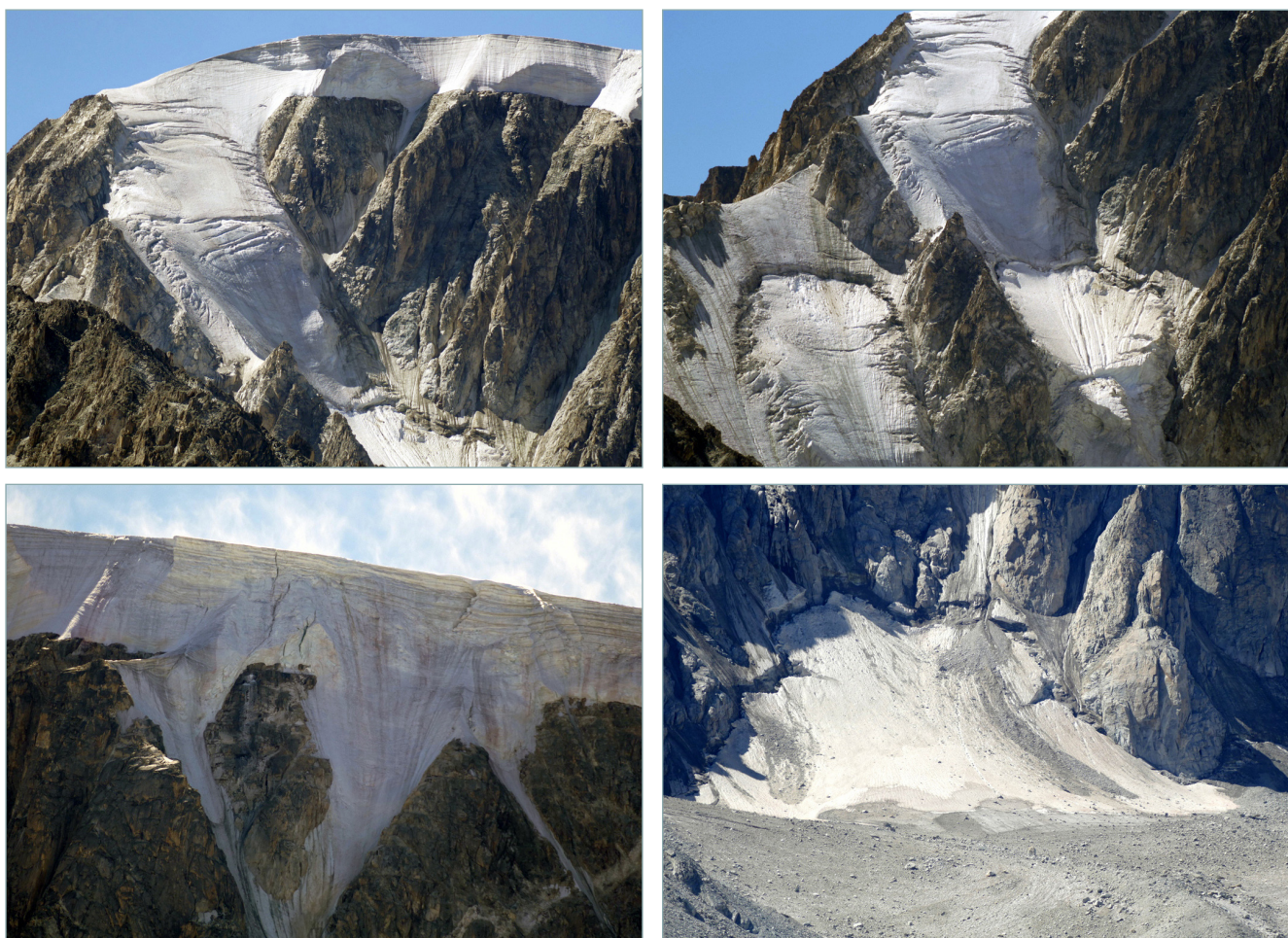


Рис. 10 

Вид на конечную морену, ледниковое озеро, крупные каменные потоки, снежник на фронте ледника (RGI60-10.01856) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Сектор А, участки 1А, 2, 3. Снимки 2024.08.16. 08.23 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5+

Fig. 10

View of the terminal moraine, glacial lake, large rock streams, snow field on the glacier front (RGI60-10.01856) of the Tsengel Khairkhan uul complex. Sector A, sites 1A, 2, 3. Photos 2024.08.16. 08.23 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5+



Рис. 11 

Вид на фронт висячего ледника (RGI60-10.01853), склон и миниатюрный селевой поток комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Склон северо-восточной экспозиции. Сектор С, участки 1С, 10. Снимки 2024.08.23. 12.03. GMT 5+

Fig. 11

View of the front of the hanging glacier (RGI60-10.01853), slope and miniature mudflow of the Tsengel Khairkhan uul complex. Slope of north-eastern exposure. Sector C, sites 1C, 10. Photos 2024.08.23. 12.03. GMT 5+



3.2 Древнее оледенение

Граница позднеплейстоценового гляциального комплекса Цэнгэл-Хайрхан, ясно читающаяся на спутниковых снимках, состоит из нескольких крупных участков. Следы деградации ледников хорошо видны. При анализе снимков просматриваются шесть направлений деградации ледникового покрова. Из них особенно зрелищные три: **В**, **С**, **Д**, находящиеся на северо-западе, юго-западе и востоке от массива. Полевые исследования на данный момент проходили только на участке **С**.

Хорошо выраженный конечно-моренный комплекс позднеплейстоценового возраста находится на высоте 2400 м в верховьях долины р. Харганат-Гол и является моренно-подпрудной плотиной озера Хар-Нуур. Озеро располагается в котловине, образованной западным склоном долины Харганат-Гол, невысоким отрогом горного массива Цэнгэл (между долиной р. Харганат-Гол и Годон-Гол, правым притоком р. Ховд) и упомянутым выше конечно-моренным комплексом древнего ледника.

Ниже по долине р. Харганат-Гол при впадении в нее р. Модон-Сала находится еще один мощный конечно-моренный комплекс ледников, занимавших долины р. Модон-Сала, Хоромд-Булак, Талды-Булак и их притоков. Этот древний ледник заполнял долину Харганат-Гол до высоты 2240 м.

Авторы сочли, что данные интересные объекты, значимые для дальнейшего исследования, и их детальное рассмотрение заслуживают отдельной работы. Масштабы природных объектов этой группы велики для полевой фотографии и больше подходят для верификации на основе спутниковых снимков аэрофотосъемки, картирования с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Картографические изображения крупных конечных морен позднеплейстоценового возраста, расположенных к западу и юго-западу от массива (участки **В** и **Д**), созданные на основе использования обработки спутниковых данных, приведены на рис. 7.

Закономерности в размещении криогенных форм рельефа исследуются научными группами и проявляются в зависимости от высоты, экспозиции и части склона, определяющих режим и количество осадков, наличия многолетне-мерзлых пород и увлажненности грунтов. Верхние пределы распространения мерзлотных форм рельефа смыкаются с геоморфологическими объектами более высокого уровня и значительных масштабов. К ним относятся формы альпийского рельефа, флювиогляциальные отложения, современные гляциальные комплексы. Главным элементом, «ядром» для закономерно расположенных, сопряженных криогенных форм являются ледники. Репрезентативными объектами служат формы рельефа, связанные с наличием мерзлотных грунтов.

3.3 Формы рельефа, связанные с наличием мерзлотных грунтов

Ценным научным материалом являются данные об условиях формирования многолетней мерзлоты, полученные исследователями в советский период. Среди последних работ заслуживают внимания данные, собранные в рамках международной программы по изучению мерзлотных грунтов TOPP-modelling, данные 2010–2016 годов по плейстоценовому оледенению района и ряда других исследований ледниковых массивов Монгольского Алтая²⁶ [13, 14]. Актуальные данные о территории получены из пяти скважин глубиной 10 м, пробуренных в мерзлотных грунтах в долине Харгантын-Гол. Две из пяти скважин расположены в долине (2238 и 2240 м), а три находятся на ее склонах (2500, 2556 и 2557 м) равной высоты, северной, южной и юго-восточной экспозиции

26 Jambaljav Y., Gansukh Y., Temuujiin K., et al. Permafrost Map of Mongolia. Scale 1 : 1,000,000. Gazriin Zurag: Ulaanbaatar, Mongolia, 2016.

на северо-западном макросклоне массива Цэнгэл-Хайрхан. Температура фиксировалась на семи глубинах. Для рассматриваемой территории симптоматичны два показателя: среднегодовая температура грунта (MAGT) изменяется от $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Толщина активного сезонно-талого слоя СТС (ALT) показательна и находится на глубине 2,1–6,0 м. Большинство из представленных на фотоснимках объектов расположены выше.

Особенного внимания заслуживают участки многолетних мерзлотных грунтов, с которыми связаны ценные археологические находки, имеющие значение для истории расселения и жизни древнего человека и содержащие многочисленные органические субстанции. В данном высокогорном районе Большого Алтая они многочисленны [15].

Каменные потоки долины р. Хоромд-Булак относятся преимущественно к склонам западной экспозиции и являются наиболее значимыми по масштабу объектами района исследований. Серия из двух крупных объектов расположена в верхней части долины, на правом борту (3). Размеры $1,37 \times 1,15$ км, периметр 2,35 км, их расчетная площадь составляет около $0,46\text{ км}^2$. Именно они изображены на карте, составленной В.В. Обручевым на основании оригинальной маршрутной съемки и записей дневников экспедиции В.В. Сапожникова на Монгольский Алтай 1909 года. Объекты упоминаются как граница древних моренных комплексов. На рис. 5 приводятся изображения участка, подготовленные на основе использования спутниковых мозаик на исследуемый участок долины. На рис. 12 представлены фотографии двух крупных каменных потоков.

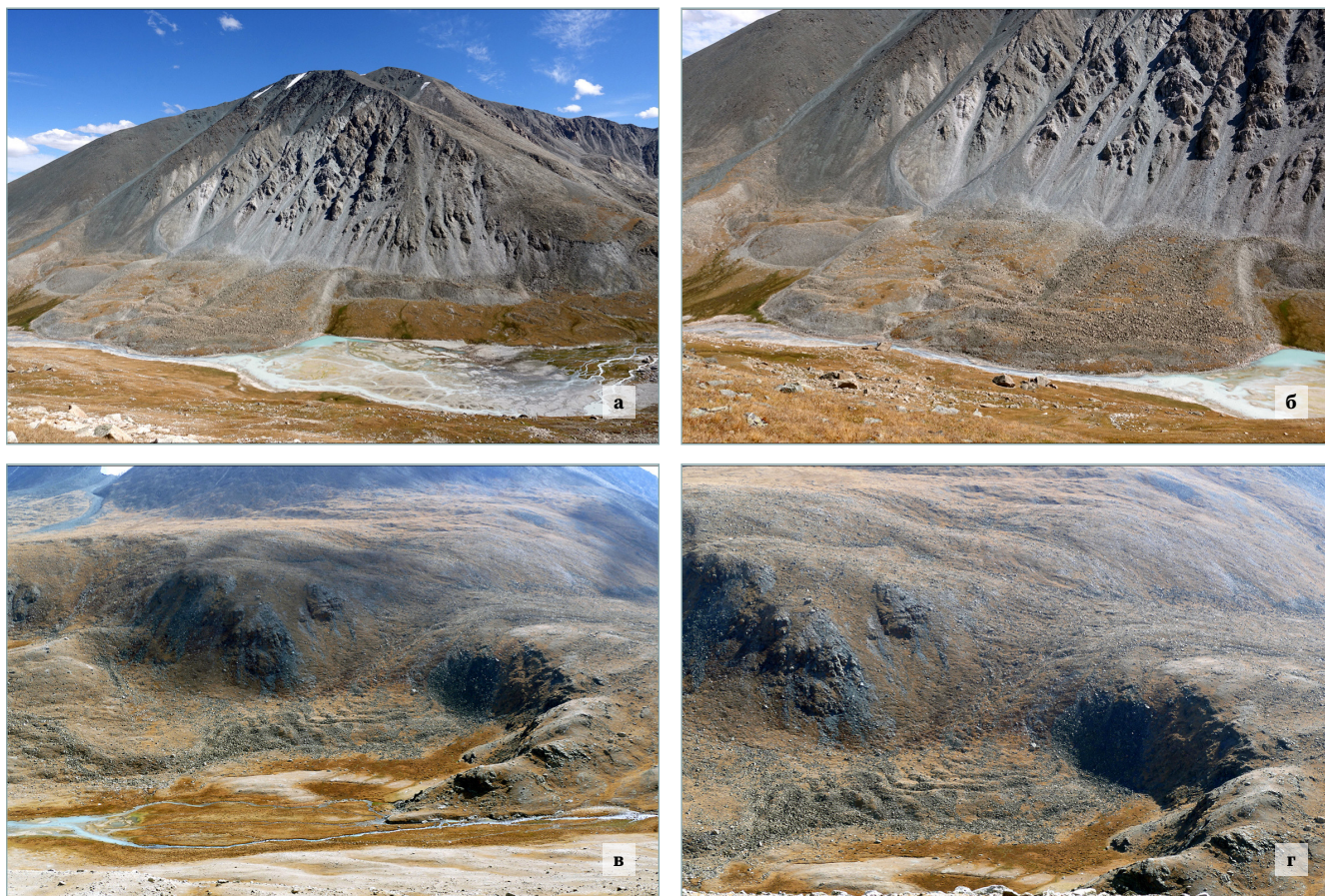
Рис. 12

Вид на крупные каменные потоки на склоне северо-западной экспозиции (а, б) и каменный поток на склоне северо-восточной экспозиции (в, г) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Сектор С, участки 3, 5.

Снимки 2024.08.20. 09.50 / 2022.09.08. 11.40. GMT 5+

Fig. 12

View of the slope large rock streams on the north-western slope (a, б) and the rock flow on the north-eastern slope (в, г) of the Tsengel Khairkhan uul complex. Sector C, sites 3, 5. Photos 2024.08.20. 09.50 / 2022.09.08. 11.40. GMT 5+



Многочисленные **мелкие каменные потоки** долины р. Хоромд-Булак относятся преимущественно к правому борту, склонам северо-западной, северной и северо-восточной экспозиции, в меньшей степени — к склонам юго-западной и восточной экспозиции.

Солифлюкционные потоки хорошо просматриваются на склонах северо-восточной и восточной экспозиции массива, расположенных на разных высотах и бортах, в долине р. Хоромд-Булак.

Репрезентативным является находящийся в средней части долины, на левом борту, солифлюкционный поток **(4)**. Координаты: $48,678976^{\circ} / 89,149965^{\circ}$. Высота 2800 м. Далее вниз по склону долины следует целый каскад подобных миниатюрных объектов **(5)** — участок с координатами $48,682092^{\circ} / 89,166599^{\circ}$ и высотой 2740 м. Крупным объектом является расположенный в нижней части долины массив с высотными отметками 2962,4 м **(6)** и его яркий склон восточной экспозиции. Координаты: $48,692673^{\circ} / 89,164659^{\circ}$.

Примечательными объектами являются расположенные в нижней части долины широкие солифлюкционные потоки **(7)**. Координаты: $48,702392^{\circ} / 89,163613^{\circ}$. Высота 2725 м.

Значимым объектом с девятью крупными валами (или серией волн) является расположенный в нижней части долины участок с озерной котловиной с южного направления **(8)**. Координаты: $48,719014^{\circ} / 89,170155^{\circ}$. Высота 2604 м.

На рис. 6 приводятся изображения участка, подготовленные на основе использования спутниковых мозаик на исследуемый участок долины. На рис. 13–15 представлены фотографии участка долины с миниатюрными формами криогенного рельефа склонов.

Рис. 13

Вид на солифлюкционные потоки на склоне северной экспозиции (а, б), склоне восточной экспозиции (в, г) долины р. Хоромд-Булак. Сектор С, участки 5, 7. Снимки 2024.08.24. 13.10 / 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

Fig. 13

View of solifluction flows on the northern slope (a, b), eastern slope (v, r) of the Khoromd-Bulak river valley. Sector C, sites 5, 7. Images 2024.08.24. 13.10 / 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

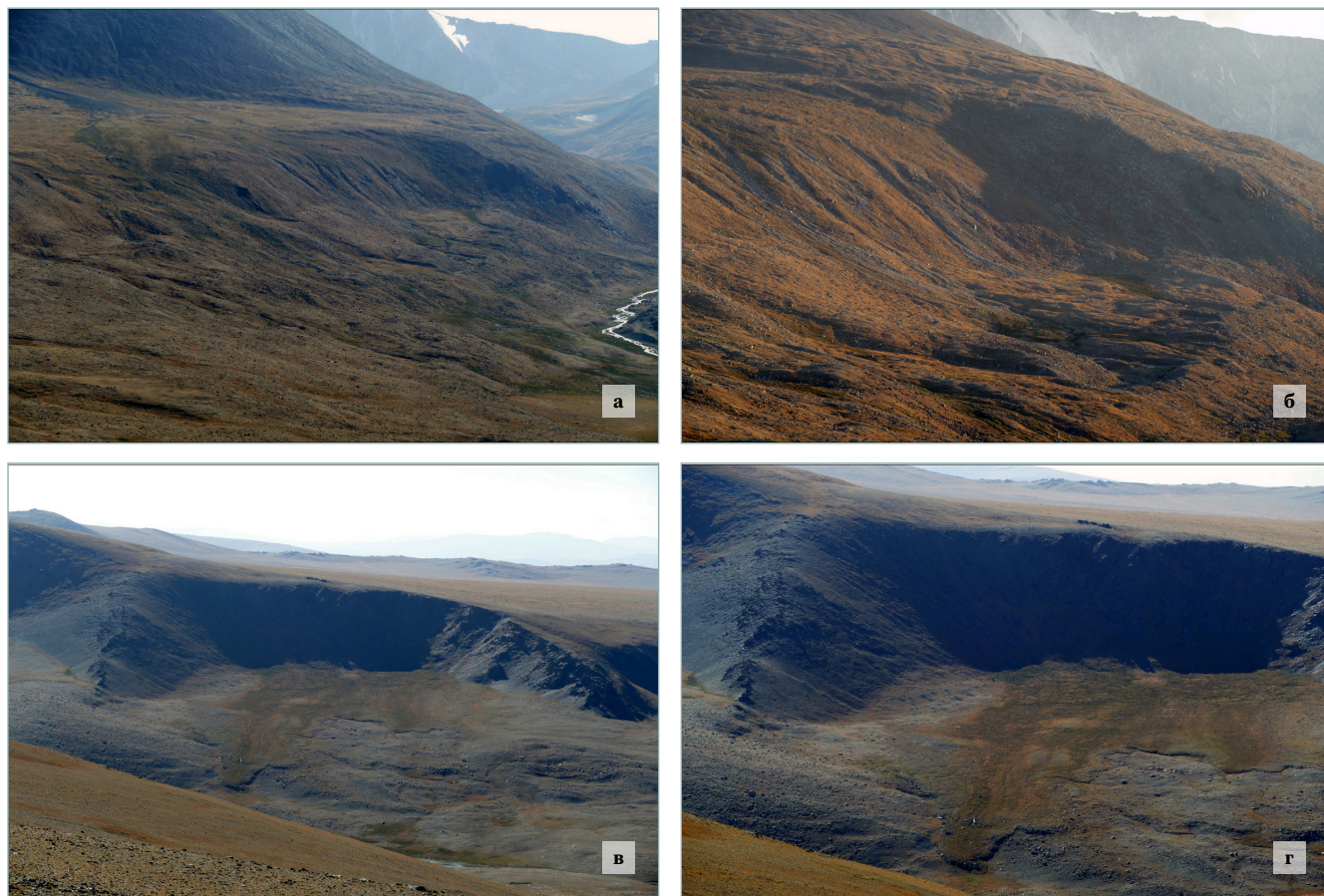


Рис. 14 

Вид на солифлюкционные потоки склонов восточной экспозиции при разном освещении. Сектор С, участок 6, левый борт долины р. Хоромд-Булак. Отметка высоты (2962,4 м). Снимки 2024.08.25. 05.08 (а, б) и 13.47 (в, г). GMT 5+

Fig. 14

View of solifluction flows of the eastern slopes under different lighting conditions. Sector C, site 6, left side of the Khoromd-Bulak river valley. Elevation mark (2962.4 m). Photos 2024.08.25. 05.08 (a, б) и 13.47 (в, г). GMT 5+

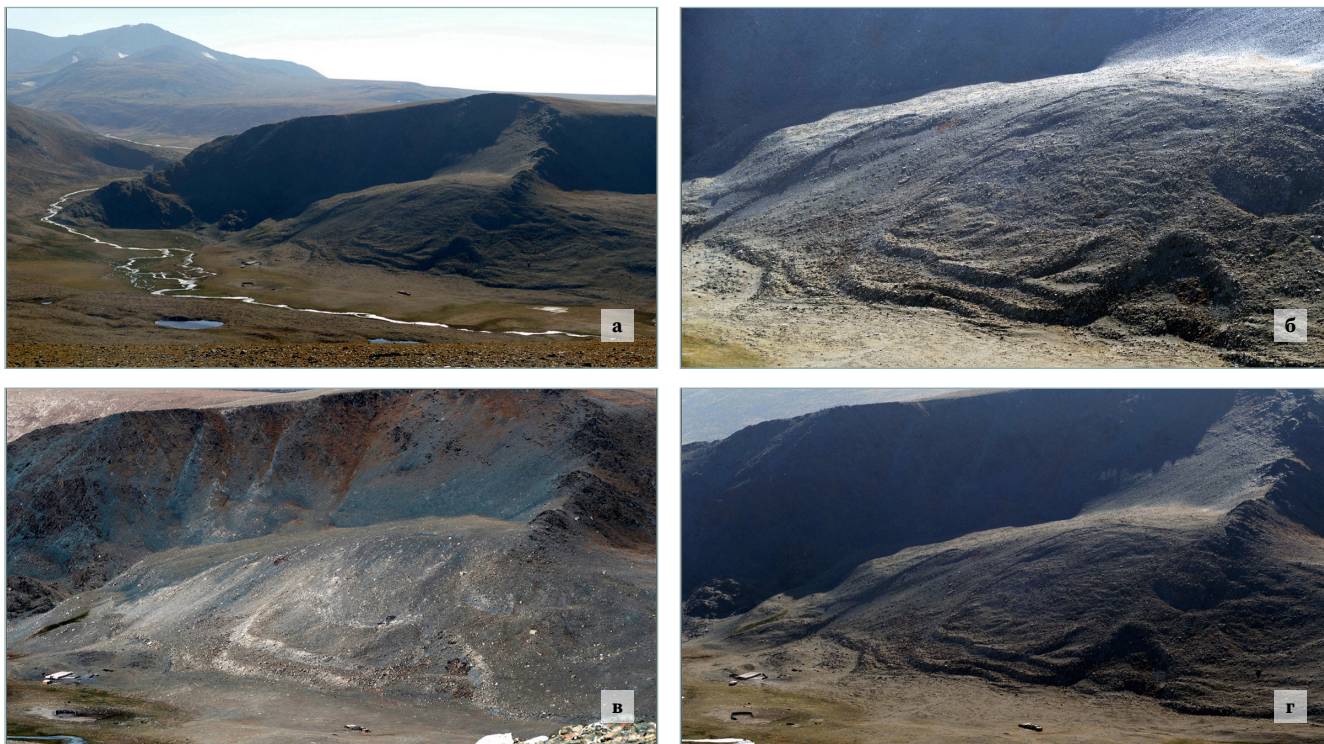


Рис. 15 

Вид на солифлюкционные потоки склонов восточной экспозиции, термокарстовые озера. Сектор С, участок 8, левый борт долины р. Хоромд-Булак. Снимки 2022.09.05. 09.50 и 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

Fig. 15

View of solifluction flows of the eastern slopes, thermokarst lakes. Sector C, site 8, left side of the Khoromd-Bulak river valley. Photos 2022.09.05. 09.50 and 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

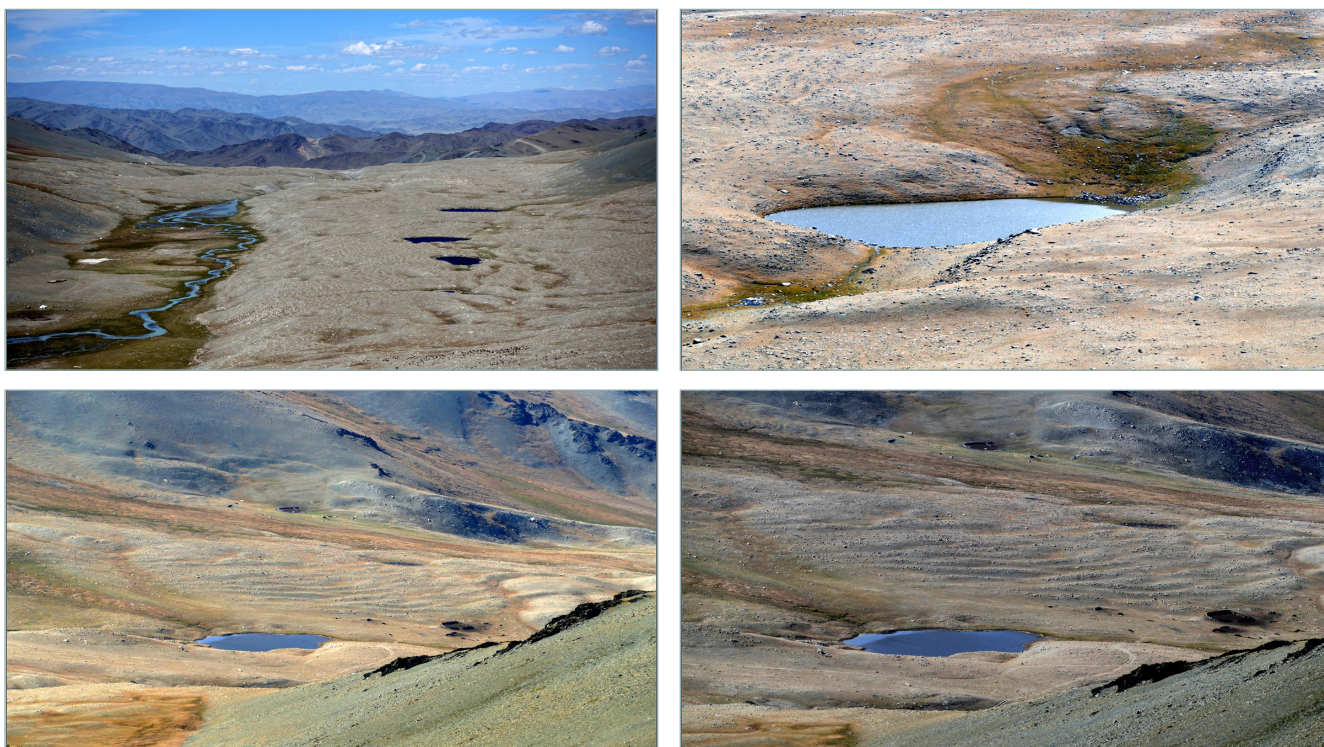


Рис. 16 ✓

Вид на миниатюрные участки термокарстового рельефа и мерзлотные бугры пучения. Сектор С, участок 9, правый борт долины р. Хоромд-Булак. Снимки 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

Fig. 16

View of miniature areas of thermokarst relief and frozen frost mounds. Sector C, site 9, right side of the Khoromd-Bulak river valley. Photos 2024.08.25. 15.25. GMT 5+



Участки с **развитием термокарста и структурными грунтами** и другими мелкими объектами расположены в долине р. Хоромд-Булак практически повсеместно. Яркими образцами являются три группы мелких озер в термокарстовых котловинах, в средней части долины (9). Координаты (наиболее крупное): $48,699602^{\circ} / 89,177696^{\circ}$. Высота 2675 м. На правом борте средней части долины находятся миниатюрные участки со структурными грунтами и развитием термокарста. Координаты: $48,689421^{\circ} / 89,175888^{\circ}$. Высота 2713 м. Фотографии участка долины с развитием термокарста и структурными грунтами на левом борту долины представлены на рис. 16.

4 Обсуждение

В результате проведения полевого этапа исследования — сбора материалов об особенностях территории Монгольского Алтая — был выбран репрезентативный участок высокогорной зоны с хорошо выраженными формами криогенного рельефа. На основе ГИС проведены обработка полевых материалов, интерпретация спутниковых данных, визуализация данных ЦМР.

Подготовлен раздел каталога географических объектов с унифицированными иллюстрациями геоморфологических особенностей территории, а также информацией, значимой как для образования, так и для развития геотуризма. Теоретическое обоснование, критерии выделения и варианты классификации географически значимых объектов («геотопов») ранее опубликованы, приведены в работах, посвященных горным территориям мира [16–19].

Выделенные объекты криогенного генезиса являются типичными объектами высокогорной зоны, расположены на северо-западном, северо-восточном макросклонах массива Цэнгэл-Хайрхан, в долине р. Хоромд-Булак вне пределов

охраняемой территории. Объекты располагаются на обоих бортах долины. При движении по долине они закономерно проявляются на разных высотах. Гляциальные и нивальные формы верхнего яруса сменяются мерзлотными, расположенными в нижней части долины. Далее, за пределами выделенных участков, по мере спуска и потери высоты, в нижней части долины будут располагаться формы рельефа флювиального происхождения — аккумулятивные и эрозионные формы, водно-ледниковые отложения.

5 Выводы

Выбранная территория Монгольского Алтая — труднодоступный, высокогорный, мерзлотный район с набором характерных форм рельефа, следами масштабного древнего оледенения, динамично идущими современными процессами преобразования поверхности. На основе ГИС, интерпретации спутниковых данных, новых методик визуализации подготовлена серия унифицированных картографических изображений, подчеркивающих яркие геоморфологические особенности территории. Материалы находятся в свободном доступе.

Изолированный массив Цэнгэл-Хайрхан, несмотря на отсутствие крупных форм оледенения, является природным объектом с набором репрезентативных участков — ярких форм рельефа криогенного генезиса разного возраста, значимых для научных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят исследователей — преподавателей и студентов кафедры географии Института математики и естественных наук Монгольского национального университета образования, кафедры географии Ховдского филиала Монгольского государственного университета и лично Чойжинжавын Лхагвасурэн, Хадбаатар Сандаг, Батцогт Алдарцогт и Эрдэнэжаргал Наранхуу за помощь в организации и проведении краткой экспедиционной поездки на Монгольский Алтай в январе 2024 года. Авторы выражают благодарность за оказанную помощь водителям Алтанбеку Ш., Нурболу Х., Нурбеку М., ставшим верными спутниками в экспедиционных поездках. Авторы также признательны помогавшим им в работе жителям населенных пунктов Алтынцугс, Саксай, Цэнгэл, Улаанхус (Баян-Ульги).

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Ганюшкин Д.А. Гляциогенные комплексы резконтинентального района северо-запада Внутренней Азии: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2016. 430 с.
2. Walther M., Dashtseren A., Kamp U., et al. Glaciers, Permafrost and Lake Levels at the Tsengel Khairkhan Massif, Mongolian Altai, During the Late Pleistocene and Holocene // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No. 73. P. 1–20. DOI:10.3390/geosciences7030073.
3. Pfeffer W.T., Arendt A.A., Blissl A., et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers // *Journal of Glaciology*. 2014. Vol. 60. No. 221. P. 537–552. DOI:10.3189/2014JoG13J176.
4. Михайлов Н.Н., Останин О.В., Фукуи К. Гляциально-мерзлотные каменные образования Алтая и их изменения // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география*. 2007. Т. 3. С. 91–99.
5. Останин О.В., Михайлов Н.Н. Современные изменения высокогорных геосистем (на примере Центрального и Юго-Восточного Алтая): монография. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. 171 с.
6. Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., et al. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 6. 1508. DOI:10.3390/rs14061508.
7. Hawker L., Uhe P., Paulo L., et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. No. 2. 024016. DOI:10.1088/1748-9326/ac4d4f.
8. Guth P.L., Trevisani S., Grohmann C.H., et al. Ranking of 10 Global One-Arc-Second DEMs Reveals Limitations in Terrain Morphology Representation // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. No. 17. 3273. DOI:10.3390/rs16173273.

9. Douglass N.A.K., Fish C.S. That's a Relief: Assessing Beauty, Realism, and Landform Clarity in Multilayer Terrain Maps // *Cartographic Perspectives*. 2022. No. 100. P. 43–66. DOI:10.14714/CP100.1727.
10. Kokalj Z., Somrak M. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 7. 747. DOI:10.3390/rs11070747.
11. Chiba T., Kaneta S., Suzuki Y. Red Relief Image Map: New visualization method for three dimensional data // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. 37. Part B2. P. 1071–1076.
12. Chiba T., Hasi B. Ground surface visualization using Red Relief Image Map for a variety of map scales // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. Vol. 41. Part B2. P. 393–397. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-393-2016.
13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 193. P. 299–316.
14. Klinge M., Schlüt F., Zander A., et al. Late Pleistocene lake level, glaciation and climate change in the Mongolian Altai deduced from sedimentological and palynological archives // *Quaternary Research*. 2021. Vol. 99. P. 168–189. DOI:10.1017/qua.2020.67.
15. Taylor W., Hart I., Pan C., et al. High altitude hunting, climate change, and pastoral resilience in eastern Eurasia // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 14287. DOI:10.1038/s41598-021-93765-w.
16. Lagally U., Rohrmuller J., Glaser S., et al. Hundert Meisterwerke – Die schönsten Geotope Bayerns. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012. Augsburg 2. 288 s.
17. Абдульмянов С.Н. Геотопы юго-востока Горного Алтая // *Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки*. 2008. № 1. С. 127–135.
18. Reynard E., Coratza P., Regolini-Bissig G. *Geomorphosites*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2009. 240 p.
19. Chlachula J. Geoheritage of East Kazakhstan // *Geoheritage*. 2020. Vol. 12. 91. DOI:10.1007/s12371-020-00514-y.


АВТОРЫ **Абдульмянов Саид Нурмухамматович**

ФГБУН «Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН»
(ГТМ РАН), Москва, Россия;

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина», Москва, Россия
кафедра геоэкологии, факультет геологии и геофизики нефти и газа
канд. геогр. наук, доцент

 0000-0003-2053-8230

Михайлов Николай Николаевич

 nn_mikhaylov@guu.ru

ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», Москва, Россия
канд. геогр. наук, доцент

Поступила 06.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Cryogenic landforms of the Tsengel Khairkhan uul, Mongolian Altai

Said N. Abdulmyanov^{1,2}✉, Nikolay N. Mikhailov³

¹ Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia

³ State University of Management, Moscow, Russia

✉ abdulmyanov@gmail.com

CITATION Abdulmyanov SN, Mikhailov NN. Cryogenic landforms of the Tsengel Khairkhan uul, Mongolian Altai. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 46–68. DOI:10.30533/GiA-2025-013.

KEYWORDS satellite data, digital surface model, field research methods, geomorphological features, cryogenic landforms, depiction of landforms on maps, Mongolian Altai

ABSTRACT Mountain landscapes are complex, highly dissected, fragmented and pose complex problems for specialists in visualizing surface data. A large number of scientific publications are devoted to the features of the Altai mountain system. Significant are the materials of the complex description of the territory of the Mongolian Altai, collected during the expeditions of V.V. Sapozhnikov in the period 1905–1909. Upon completion of field research, information on the forms of ancient and modern glaciation is systematized and presented in a visual form in the conclusions and in the cartographic work (map). The article considers a fragment of the isolated Tsengen-Khaikhan uul massif with thin glaciation and the trough valley of the Khoromd-Bulak river, the right tributary of the Khargantyn gol (Karaganty) river, the Khovd river basin, formerly Kobdo). As the methods of studying the earth’s surface improve, large arrays of research data accumulate, and new methods of depicting surface relief appear, new opportunities for visualizing data on the location and morphological features of natural objects arise. At the same time, the importance of route observations as the main method of direct visual perception, identifying important features and characteristics of the object under study is great. Without data coming from research routes, detailed mapping of objects, it is impossible to implement the tasks of studying geomorphological and a number of other features of mountainous areas. In the article, based on the use of satellite data and new methods, cryogenic relief forms of the Tsengen-Khaikhan uul glacial complex of different levels and genesis are identified and depicted. Interest in the study of the features of mountain landscapes unites researchers from different countries.

ACKNOWLEDGEMENTS


The authors thank the researchers – teachers and students of the Department of Geography of the Institute of Mathematics and Natural Sciences of the Mongolian National University of Education (MNUE), the Department of Geography of the Khovd Branch of the National University of Mongolia and personally Lhagvasuren Choijinjav, Khadbataar Sandag, Battsoigt Aldartsogt and Erdenejargal Narankhuu for their assistance in organizing and conducting a short expedition trip in January 2024 to the Mongolian Altai. The authors thank the drivers Altanbek Sh., Nurbol Kh., Nurbek M. for their assistance, who became faithful companions in expedition trips. The authors are also grateful to the residents of the settlements: Altyntsugs, Saksai, Tsengel, Ulankhus (Bayan-Ulgi), who helped in the work.

REFERENCES

- Ganyushkin DA. *Gljaciogenyye komplekсы rezkokontinental'nogo rajona severo-zapada Vnutrennej Azii* [Glaciogenic complexes of the sharply continental region of the north-west of Inner Asia] [dissertation]. St. Petersburg, 2016. 430 p. (In Russian).
- Walther M, Dashtseren A, Kamp U, et al. Glaciers, Permafrost and Lake Levels at the Tsengel Khairkhan Massif, Mongolian Altai, During the Late Pleistocene and Holocene. *Geosciences*. 2017;7(73): 1–20. DOI:10.3390/geosciences7030073.
- Pfeffer WT, Arendt AA, Blissl A, et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*. 2014;60(221): 537–552. DOI:10.3189/2014JoG13J176.
- Mikhailov NN, Ostanin OV, Fukui K. Glacial-permafrost rock formations of Altai and their changes [Gljacial'no-merzlotnye kamennye obrazovaniya Altaja i ih izmeneniya]. *Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology, Geography*. 2007;3: 91–99. (In Russian).
- Ostanin OV, Mihajlov NN. *Sovremennyye izmeneniya vysokogornyyh geosistem (na primere Central'nogo i Jugo-Vostochnogo Altaja)* [Modern changes in high-mountain geosystems (on the example of Central and South-Eastern Altai)] [monograph]. Barnaul: Publishing House of the Altai University; 2013. 171 p. (In Russian).
- Ganyushkin D, Chistyakov K, Derkach E, et al. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sensing*. 2022;14(6): 1508. DOI:10.3390/rs14061508.
- Hawker L, Uhe P, Paulo L, et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*. 2022;17(2): 024016. DOI:10.1088/1748-9326/ac4d4f.
- Guth PL, Trevisani S, Grohmann CH, et al. Ranking of 10 Global One-Arc-Second DEMs Reveals Limitations in Terrain Morphology Representation. *Remote Sensing*. 2024;16(17): 3273. DOI:10.3390/rs16173273.
- Douglass NAK, Fish CS. That's a Relief: Assessing Beauty, Realism, and Landform Clarity in Multilayer Terrain Maps. *Cartographic Perspectives*. 2022;100: 43–66. DOI:10.14714/CP100.1727.
- Kokalj Z, Somrak M. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing*. 2019;11(7): 747. DOI:10.3390/rs11070747.
- Chiba T, Kaneta S, Suzuki Y. Red Relief Image Map: New visualization method for three dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008;37(B2): 1071–1076.
- Chiba T., Hasi B. Ground surface visualization using Red Relief Image Map for a variety of map scales. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016;41(B2): 393–397. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-393-2016.
- Obu J, Westermann S, Bartsch A, et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*. 2019;193: 299–316.
- Klinge M, Schlüt F, Zander A, et al. Late Pleistocene lake level, glaciation and climate change in the Mongolian Altai deduced from sedimentological and palynological archives. *Quaternary Research*. 2021;99: 168–189. DOI:10.1017/qua.2020.67.
- Taylor W, Hart I, Pan C, et al. High altitude hunting, climate change, and pastoral resilience in eastern Eurasia. *Scientific Reports*. 2021;11:14287. DOI:10.1038/s41598-021-93765-w.
- Lagally U, Rohrmüller J, Glaser S, et al. *Hundert Meisterwerke – Die schönsten Geotope Bayerns*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012. Augsburg 2. 288 s. (In German).

17. Abdulmyanov SN. Geotopy jugo-vostoka Gornogo Altaja [Geotopes of the south-east of the Altai Mountains]. *Bulletin of Moscow State Pedagogical Univ. Series: Natural Sciences*. 2008;1: 127–135. (In Russian).
18. Reynard E, Coratza P, Regolini-Bissig G. *Geomorphosites*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil; 2009. 240 p.
19. Chlachula J. Geoheritage of East Kazakhstan. *Geoheritage*. 2020;12: 91. DOI:10.1007/s12371-020-00514-y.

AUTHORS **Said N. Abdulmyanov**

Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia
Geoecology Department, Faculty of Petroleum Geology and Geophysics
PhD in Geography, Associate Professor
 0000-0003-2053-8230

Nikolay N. Mikhailov

 nn_mikhaylov@guu.ru
State University of Management, Moscow, Russia
PhD in Geography, Associate Professor

Submitted: November 06, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Структурно-функциональный аппарат цифровой карты

Я.Г. Пошивайло¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия

yaroslava@ssga.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Пошивайло Я.Г. Структурно-функциональный аппарат цифровой карты // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 69–81. DOI:10.30533/GiA-2025-014.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА картографирование, роботизация, формализация, структура цифровой карты, инвариантность структурных элементов карты

АННОТАЦИЯ В статье рассматриваются подходы к формализации экспертных картографических знаний для дальнейшего развития технологий искусственного интеллекта. Отмечается, что среди прочих объектов формализации важную роль играет внутренняя структура цифровой карты, которая формируется при использовании цифрового представления картографической информации, при этом изменяется методика картографирования. Цифровые карты в настоящее время создаются в программных комплексах, которые относятся к разным классам (программы графического дизайна, системы автоматизированного проектирования, геоинформационные системы). В статье анализируются различия во внутренней структуре цифровой карты в зависимости от применяемого программного обеспечения и моделей представления данных (векторные, растровые). Автор предлагает рассматривать цифровую карту как совокупность структурных элементов и структурных моделей, которые через появление дополнительных функций приводят к возникновению таких технологических свойств цифровой карты, как адаптивность, интерактивность, мультимасштабность. Рассматривается также понятие инвариантности структурных элементов карты, которое позволяет оценить степень изменчивости формы и содержания карты при ее создании и использовании. Для формализации этапа проектирования цифровой карты предлагаются критерии выбора цифровой среды. Итогом исследования являются положения, раскрывающие структурно-функциональный аппарат цифровой карты в вербальном и формальном представлении.

1 Введение

Внедрение цифровых технологий в картографию, начавшись в середине XX века, с тех пор только набирает темпы. Целью дальнейшей цифровизации и интеллектуализации в картографии является удовлетворение таких актуальных потребностей пользователей картографической продукции, как персонализированный подход к потребителю пространственной информации, повышение оперативности создания и доступности картографических материалов, разработка новых видов картографической продукции. Достижение этой цели невозможно без роботизации (как более сложного вида автоматизации) картографических процессов на базе искусственного интеллекта. Многие авторы отмечают приоритетность реализации систем искусственного интеллекта в картографии для достижения практически полной автоматизации картографического производства и вызванную этим необходимость формализации процесса картографирования [1–5].

Для дальнейшего развития технологий искусственного интеллекта необходимо как можно более полно формализовать экспертные картографические знания. Среди прочих объектов формализации важную роль играет структура цифровой карты.

Классики отечественной картографии^{1,2} сходились во мнении, что элементами аналоговой карты являются картографическое изображение, легенда, вспомогательное оснащение, дополнительное содержание. Картографическое изображение строится на математической основе, которая, в свою очередь, состоит из географической сетки, масштаба, компоновки. Все элементы аналоговой карты одновременно представлены на твердом носителе, внутренняя структура у аналоговой карты отсутствует.

Карта, созданная на компьютере, является гораздо более сложной конструкцией по сравнению с аналоговой картой. В данном исследовании будем считать цифровой картой **всякую неаналоговую карту**, что, в общем, не противоречит государственному стандарту: цифровая электронная карта — цифровая картографическая модель, содержание которой соответствует содержанию карты определенного вида и масштаба; цифровая картографическая модель — логико-математическое представление в цифровом виде объектов картографирования и отношений между ними³.

ГОСТ Р 51605-2000⁴ устанавливает, что структурной единицей цифровой картографической информации является объект цифровой топографической карты. В состав объекта цифровой топографической карты также входит семантическая информация.

ГОСТ Р 70955-2023⁵ содержит следующие определения, относящиеся к структуре карты:

- объект цифровой [электронной] карты — структурная единица цифровой [электронной] картографической модели, описывающая объект местности или иную информацию в составе цифровой [электронной] карты;
- структурная единица цифровой карты — совокупность данных цифровой [электронной] карты, имеющая самостоятельное значение.

На наш взгляд, **внутренняя структура цифровой карты зависит от технических и программных средств, в среде которых цифровая карта создана и функционирует, а также от моделей представления данных**. Таким образом, при проведении

1 Салищев К.А. Картография: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 267 с.

2 Берлянт А.М. Картография: учебник для вузов. М.: Аспект-Пресс, 2002. 336 с.

3 ГОСТ Р 70955-2023. Картография цифровая. Термины и определения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 11 с.

4 ГОСТ Р 51605-2000. Карты цифровые топографические. Общие требования. М.: Госстандарт России, 2000. 8 с.

5 ГОСТ Р 70955-2023. Картография цифровая. Термины и определения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 11 с.

формализации необходимо учитывать эту внутреннюю структуру и ее влияние на технологические процессы.

Преобладающей технологией в картографическом производстве на сегодняшний день является геоинформационное картографирование. На ряде технологических этапов находят свое применение системы автоматизированного проектирования (САПР), программы графического дизайна и программы трехмерного моделирования.

В концепцию программного обеспечения геоинформационных систем (ГИС) идея поддержки географических координат была заложена изначально. САПР, напротив, были ориентированы на работу с декартовой системой координат и ведение проектных работ в крупных масштабах, однако сегодня для многих САПР, таких как Autodesk Civil 3D, Bentley PowerCivil, разработаны программные модули, реализующие поддержку географических систем координат и проекционные преобразования, поддерживающие структуры и форматы баз геоданных, послойную структуру цифровой карты и топологические инструменты. Конечно, такие программные модули во многом специфичны и направлены, например, на проектирование и анализ дорожной сети, инженерных коммуникаций, других инженерных сетей и объектов (узкая специализация).

Рассматривая различия между ГИС и САПР, можно сказать, что САПР больше ориентированы на объект проектирования (объект эксплуатации), а ГИС — на территорию в целом. Однако различия между этими инструментами постепенно стираются [6, 7]: ГИС и САПР взаимообогащаются функционалом, поэтому анализ различий между ними, проведенный, например, год назад, сегодня становится уже неактуальным.

Программы графического дизайна, такие как CorelDRAW, Adobe Illustrator, Macromedia FreeHand, внесли значительный вклад в цифровую революцию, произошедшую в картографическом производстве на рубеже XX–XXI веков, и до сих пор многие их возможности в оформлении картографической продукции не реализованы в ГИС или САПР.

Рассмотрим далее внутреннюю структуру цифровой карты в зависимости от используемых технических и программных средств и оценим степень инвариантности ее структурных элементов.

2 Материалы и методы

2.1 Внутренняя структура цифровой карты

С переходом картографического производства на цифровые технологии произошли трансформации, которые были вызваны новыми технологическими свойствами цифровой карты, обусловленными цифровым картографическим моделированием. Цифровую карту можно рассматривать как **совокупность структурных элементов, формирующих, в свою очередь, функциональные структурные модели**. Структура цифровой карты напрямую зависит от программного обеспечения, в среде которого создается и функционирует цифровая карта.

Чтобы нагляднее представить функциональные преимущества цифровой карты и рассмотреть ее структурные элементы, обратимся к понятию «инвариантность структурных элементов карты», предложенному автором в 2020 году [8]. Данный термин отражает неизменность элементов карты в технологическом аспекте.

У аналоговой карты **инвариантны (неизменны) все ее структурные элементы**. Аналоговое картографическое изображение не подлежит редактированию, поскольку оно сформировано из цифровой формы представления для каждой отдельной аналоговой карты единственный раз, и все структурные элементы

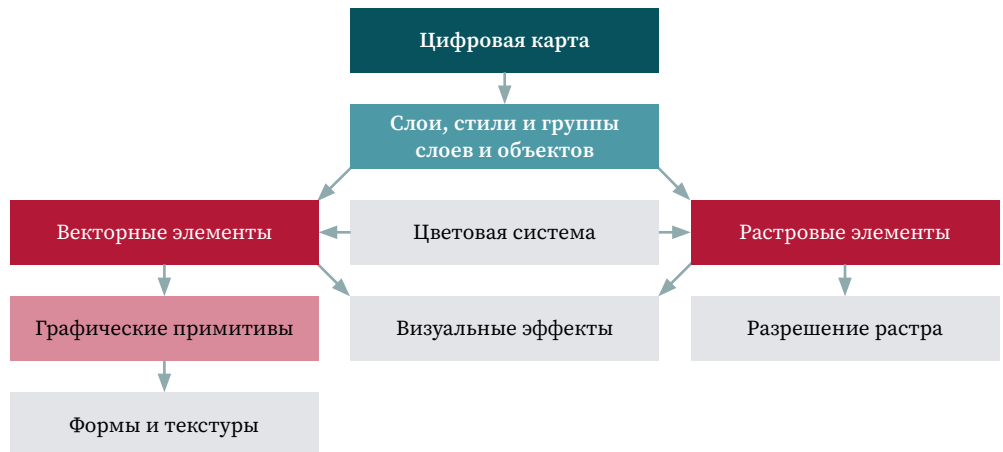
представлены одновременно, их невозможно отключить, сместить, удалить или провести с ними любые другие манипуляции [8].

Структурные элементы цифровой карты, созданной в графических редакторах (рис. 1), представлены:

- графическими примитивами в векторной форме (линии, прямоугольники, эллипсы, многоугольники, текст и др.), описанными математическими формулами;
- растровыми изображениями (географическая основа, отмывка рельефа, обложка и др.).

Рис. 1 ➤
Структурные элементы цифровой карты в графических редакторах

Fig. 1
Structural elements of a digital map in graphic editors



Векторным элементам могут назначаться оформительские стили, такие элементы могут быть объединены в группы и в слои. Из данных структурных элементов формируется электронное картографическое изображение карты (например, тематической), которое, в свою очередь, включает географическую основу, тематическое содержание, легенду, вспомогательное оснащение и дополнительное содержание. Атрибуты, как и в аналоговой карте, передаются шрифтами, графикой (цвет, тип линий, штриховка и т. д.). Атрибутивную составляющую также возможно реализовать посредством гиперссылок, однако данный подход не позволяет в полной мере реализовывать возможности пространственно-атрибутивных запросов. Такая цифровая карта **инвариантна в части ее математической основы**, при необходимости изменения математической основы карты приходится составлять ее заново. Карта, составленная в графических редакторах, в подавляющем большинстве случаев предназначена для последующей печати (преобразования в аналоговую форму).

В цифровой карте, которая создается в среде геоинформационной системы, структурные элементы формируются из «каркаса» — геоинформационной модели (ГИМ). Из одной ГИМ можно получить неограниченное число цифровых карт. Функции таких цифровых карт гораздо шире, чем у созданных с помощью графических редакторов. Цифровая карта, созданная в среде ГИС, включает следующие структурные элементы (рис. 2):

- геометрические примитивы (точки, линии, полигоны), входящие в структуру иерархической организации информационных слоев с учетом правил цифрового описания картографической информации;
- математическую основу, содержащую описание проекций, датумов, эллипсоидов, систем координат, а также формулы для выполнения пространственной привязки и преобразований геометрии объектов цифровой карты;
- атрибутивное (семантическое) описание объектов цифровой карты — количественные и качественные характеристики объектов, выраженные в алфавитно-цифровой форме.

Такая цифровая карта используется в качестве основы для визуализации ГИМ, создаваемых в процессе компьютерной геоинформационной обработки и в качестве особого интерфейса между человеком и компьютером [9].

Рис. 2 
Структурные элементы
цифровой карты в ГИС

Fig. 2
Structural elements of a digital
map in GIS



Структурные элементы цифровой карты, созданной в ГИС, формируют визуально-графическую, послойную, топологическую структурные модели и модель базы геоданных.

Касательно инвариантности цифровой карты, созданной в среде ГИС, в части ее математической основы можно отметить следующее: картографическая проекция, координатная сетка, геодезическая основа пересчитываются и перестраиваются в автоматическом режиме, разработан и успешно реализуется механизм изменения масштаба за счет такой функции цифровой карты, как мультимасштабность [10–14]. Проводятся также научные исследования и экспериментальные работы по части решения проблемы автоматической генерализации при изменении масштаба цифровой карты [15–19]. Таким образом, ограничения в плане инвариантности математической основы карты, созданной в среде ГИС, в скором времени с большой долей вероятности будут сняты.

Вторым препятствием к снижению степени инвариантности цифровой карты является то, что обзор объектов такой карты ограничен размерами устройства, которое в большинстве случаев меньше, чем линейные размеры карты соответствующего масштаба (*инвариантность полей визуализации*), а ограничения полей визуализации лишь частично компенсируются механизмом мультимасштабности. Однако можно говорить о значительном прогрессе в этом направлении. Речь идет о поддерживающих иммерсивные технологии носимых устройствах, в которых поля визуализации не ограничены. Тем не менее до настоящего времени не удается достичь *нулевой* инвариантности цифровой карты.

2.2 Функциональные структурные модели цифровой карты в среде ГИС и САПР

Анализ внутренней структуры цифровой карты показал, что существующие технологии цифрового картографирования в среде ГИС и САПР основаны на функциональных структурных моделях цифровой карты: структуре базы геоданных, послойной структуре, визуально-графической структуре и топологической структуре. Графические редакторы наделяют цифровую карту визуально-графической и послойной структурами, но не обладают базой геоданных и не поддерживают топологию (рис. 3).

Рис. 3 ⬇

Функциональные структурные модели цифровой карты в разных программных средах

Fig. 3

Functional structural models of a digital map in different software



Структура базы геоданных представляет собой способ организации массива метрических и атрибутивных данных, что увеличивает объем хранимой и выдаваемой по запросу информации и предоставляет расширенные возможности запросов (пространственных и непространственных).

Послойная структура — это способ группировки элементов цифровой карты для обеспечения удобства оперирования группами графических объектов. Такая структура обеспечивает возможность выдачи информации по требованию путем запросов и динамического масштабирования (мультимасштабности), основанных на установке свойств и правил отображения слоя. Следует отметить, что посредством атрибутивных запросов к базе данных и установки правил можно формировать внутри слоя отдельные группы, для которых затем настраивается отображение и устанавливаются масштабы видимости.

Визуально-графическая структура цифровой карты — это способ представления содержания карты, которое основывается на растровой и векторной графических моделях, имеющих свои особенности, достоинства и недостатки. Такая структура обеспечивает возможности редактирования и манипуляций с графическими представлениями объектов без потери качества составительского оригинала карты и визуальные эффекты, недостижимые для аналоговой формы карты.

Топологическая структура — это способ моделирования геометрических и (или) семантических отношений между векторными объектами. Использование правил топологии является одной из необходимых составляющих для автоматизации процессов генерализации и контроля качества цифровой карты.

В совокупности данные структурные модели позволяют реализовать такие функции карты, как (рис. 4):

- отбор объектов по атрибутам, пространственному положению;
- динамическое масштабирование;
- задание порога отображения;
- автоматизация процессов генерализации;
- возможности редактирования и манипуляций с графическими представлениями объектов без потери качества составительского оригинала карты;
- расширенные визуальные эффекты (анимация, мультимедийные элементы, изменение положения наблюдателя);
- автоматизация контроля качества карты.

Рис. 4 ⬆

Взаимосвязь структурных моделей цифровой карты с функциями, реализуемыми в ГИС и САПР

Fig. 4

Relationship between structural models of a digital map and functions implemented in GIS and CAD



Это, в свою очередь, приводит к возникновению следующих технологических свойств цифровой карты: адаптивности, интерактивности, мультимасштабности.

Адаптивность цифровой карты дает возможность визуализировать только необходимую информацию. Интерактивность цифровой карты означает возможность манипуляций с картографическим изображением. Мультимасштабность цифровой карты делает ее динамической и способной отображать данные по-разному в разных диапазонах масштабов.

3 Результаты и обсуждение

Отмеченные особенности функциональной структуры цифровой карты в различных программных средах необходимо учитывать при проектировании технологических процессов производства картографической продукции. В зависимости от перечисленных ниже критериев можно формализовать этап проектирования.

Критерии для выбора цифровой среды картографирования:

- назначение и функционал картографического произведения;
- масштаб создаваемого цифрового картографического произведения;
- содержание (общегеографическое, тематическое);
- требования к конечному виду картографического продукта (аналоговый, цифровой);
- уровень художественного оформления;
- необходимость последующего редактирования;
- необходимость динамического обновления.

На основе представленных выше рассуждений можно сформулировать следующие методологические положения.

Положение 1

Цифровая карта обладает разными наборами технологических свойств, обусловленными ее аппаратно-программной реализацией и используемыми моделями представления пространственных данных.

Обозначим цифровую карту k_c , набор технических свойств s_t , модель представления данных m_d , а программно-аппаратный комплекс n_{pa} , в таком случае

$$1 \quad \forall k_c \exists! s_t | (m_d, n_{pa}) \rightarrow s_t$$

или

$$2 \quad \forall k_c \exists! s_t | P(m_d, n_{pa}, s_t),$$

где $|P(m_d, n_{pa}, s_t)$ — трехместный предикат типа « s_t зависит от m_d и n_{pa} ».

Положение 2

Цифровую карту k_c , созданную в среде ГИС, можно представить как совокупность E_s функциональных структурных элементов s_c : структуры базы геоданных b_{ds} , послойной структуры s_s , визуально-графической структуры s_{vg} , топологической структуры s_{tl} , которые приводят к появлению новых функций и изменяют технологические свойства цифровой карты:

$$3 \quad \forall k_c \exists (E_s, S | b_{ds} \vee s_s \vee s_{tl}).$$

Положение 3

Аналоговая k_a и цифровая k_c карты обладают свойством инвариантности их структурных элементов i_s , которая характеризует степень изменчивости содержания карты s_k при ее создании:

$$4 \quad \forall k_c \wedge k_a \exists i_s | \rightarrow s_k.$$

Положение 4

По мере развития цифровых технологий в картографии уменьшается степень инвариантности структурных элементов цифровой карты.

Если процесс развития цифровых технологий обозначить как r_{ct} , показатель инвариантности элементов i_{kc} цифровой карты k_c , то

5 

$$\forall k_c \exists i_{kc} | (r_{ct} \rightarrow \max) \longrightarrow (i_{kc} \rightarrow \min).$$

Приведенные положения составляют одну из базовых частей общей методологии формализации процессов картографирования для их последующей цифровой трансформации, автоматизации и роботизации.

4 Выводы

В связи с переходом к цифровой форме представления картографической информации стало возможным обсуждать внутреннюю (цифровую) структуру карт, создаваемых при помощи компьютеров. Цифровую карту предлагается рассматривать как совокупность структурных элементов и структурных моделей, которые через появление дополнительных функций приводят к возникновению таких технологических свойств цифровой карты, как адаптивность, интерактивность, мультимасштабность.

Очевидно, что аналоговая карта и созданные инструментами графических редакторов или в ГИС цифровые карты обладают разной степенью изменчивости формы и содержания. Введенный термин «инвариантность структурных элементов карты» позволяет оценить эту степень изменчивости и указывает направление развития картографии по пути к достижению нулевой инвариантности.

Расширение перечня источников пространственных данных и форматов представления картографической информации, новые способы использования карт в цифровой среде — все это приводит к тому, что специалист в области картографии должен обладать целым рядом компетенций для построения технологической цепочки создания карты с учетом многообразия исходных данных и видов картографической продукции. Повысились также требования к скорости обработки и визуализации пространственной информации, что предполагает использование современных информационных технологий с элементами искусственного интеллекта, а для развития концепции цифровых двойников, очень востребованной сегодня экономикой и обществом, необходимо обеспечить картографирование в режиме, приближенном к реальному времени [20]. В связи с этим в статье предложены критерии для выбора цифровой среды картографирования и сформулированы положения, раскрывающие структурно-функциональный аппарат цифровой карты в вербальном и формальном представлении.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит доктора технических наук, профессора Д.В. Лисицкого за ценные рекомендации при проведении исследования и подготовке статьи.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Лисицкий Д.В. Картография в эпоху информатизации: новые задачи и возможности // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 22–28. DOI:10.1134/S187537281604003X.
2. Карпик А.П., Лисицкий Д.В. Перспективы развития геодезического и картографического производства и новая парадигма геопрограммной деятельности // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 2. С. 19–29. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-19-29.
3. Андрюхина Ю.Н., Бугаков П.Ю., Касьянова Е.Л. и др. Цифровая картография: монография / под науч. ред. Д.В. Лисицкого. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. 442 с.
4. Yuhao K., Gao S., Roth R.E. Artificial Intelligence Studies in Cartography: A Review and Synthesis of Methods, Applications, and Ethics // Cartography and Geographic Information Science. 2024. Vol. 51. No. 4. P. 599–630. DOI:10.1080/15230406.2023.2295943.

5. Harrie L., Touya G., Oucheikh R., et al. Machine learning in cartography // *Cartography and Geographic Information Science*. 2024. Vol. 51. No. 1. P. 1–19. DOI:10.1080/15230406.2023.2295948.
6. Talipova L., Grebenyuk E., Ogurtsov G., et al. Perspectives of Interactions CAD and GIS Systems // *Proceedings of International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering – 2022*. Cham: Springer, 2022. Vol. 291. P. 449–464. DOI:10.1007/978-3-031-14623-7_39.
7. Saganiak K., Buketov V. Integrating mining software, CAD, and GIS technologies for enhanced 3D geological mapping and visualization // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 567. 01021. DOI:10.1051/e3sconf/202456701021.
8. Пошивайло Я.Г. Анализ структурных элементов цифровой тематической карты // *Сборник материалов XVI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»*: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. Т. 1. № 2. С. 62–67. DOI:10.33764/2618-981X-2020-1-2-62-67.
9. Кацко С.Ю. Неогеография и картография // *Сборник материалов IX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»*: в 8 т. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. С. 102–106.
10. Самсонов Т.Е. Мультимасштабное картографирование — новое направление картографии // *Современная географическая картография: сборник статей / под ред. И.К. Лурье, В.И. Кравцовой*. М.: ДАТА+, 2012. С. 21–35.
11. Крылов С.А. Автоматизация отбора общегеографических объектов при создании мультимасштабных карт // *Сборник материалов XVII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»*: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 1. С. 178–183. DOI:10.33764/2618-981X-2021-1-178-183.
12. Фещенко А.П., Крылов С.А. Принципы создания и размещения подписей населенных пунктов на мультимасштабной карте // *Сборник материалов XIX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»*: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 1. № 2. С. 86–93. DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-2-86-93.
13. Viaña R., Magillo P., Puppo E. Multi-Scale Geographic Maps // *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. P. 101–115. DOI:10.1007/3-540-26808-1_6.
14. Демиденко А.Г., Кириченко А.С., Кружков А.Е. Технология автоматизированной генерализации для создания мультимасштабных карт // *Геопрофи*. 2019. № 6. С. 16–19.
15. Самсонов Т.Е. Автоматизированное совмещение цифровой модели рельефа и векторных данных о гидрографической сети // *Геоинформационное картографирование в регионах России: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции*. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2020. С. 294–301.
16. Шурыгина А.А., Самсонов Т.Е. Автоматизированное распознавание регулярных, радиальных и кольцевых структур в конфигурации улично-дорожной сети населенных пунктов // *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС»*. М.: Изд-во Московского университета, 2020. Т. 26. № 1. С. 410–420. DOI:10.35595/2414-9179-2020-1-26-410-420.
17. Самсонов Т.Е., Прохорова Е.А. Генерализация транспортных сетей при мультимасштабном картографировании // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2019. № 1. С. 107–117. DOI:10.31857/S2587-556620191107-117.
18. Бровка Е.А., Софинов Р.Э. Прогрессивные методы автоматизированной генерализации цифрового картографического изображения в процессе государственного топографического мониторинга // *Международный год карт в России: объединяя пространство и время: сборник тезисов Всероссийской научной конференции*. М.: МГУ, 2016. С. 40–41.
19. Ajdacka I., Karsznia I. Verifying and improving map specifications of river network selection for automatic generalization of small-scale maps // *Polish Cartographical Review*. 2022. Vol. 54. P. 75–91. DOI:10.2478/pcr-2022-0006.
20. Лисицкий Д.В., Осипов А.Г., Савиных В.Н. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования // *Сборник материалов XVIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»*: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 1. С. 206–212. DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.

АВТОР Пошивайло Ярослава Георгиевна

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

кафедра картографии и геоинформатики, Институт геодезии и менеджмента
канд. техн. наук, доцент

 0000-0002-1945-442X

Поступила 22.01.2025. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Structural and functional composition of a digital map

Yaroslava G. Poshivaylo¹✉

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
✉ yaroslava@ssga.ru

CITATION Poshivaylo YaG. Structural and functional composition of a digital map. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 69–81. DOI:10.30533/GiA-2025-014.

KEYWORDS mapping, robotization, formalization, digital map structure, invariance of structural elements of the map

ABSTRACT Approaches to formalization of expert cartographic knowledge for further development of artificial intelligence technologies are discussed. It is noted that among other objects of formalization, an important role is played by the internal structure of the digital map, which is formed using the digital form of presentation of cartographic information, while the methodology of mapping changes. Digital maps are currently created in software packages belonging to different classes: graphic design programs, computer-aided design systems, geographic information systems. The article analyzes the differences in the internal structure of a digital map depending on the software used (graphic editors, computer-aided design systems, geographic information systems) and data presentation models (vector, raster). The author proposes to consider a digital map as a set of structural elements and structural models, which through the emergence of new functions leads to the emergence of new technological properties of the digital map: adaptability, interactivity, multi-scale. Also the concept of invariance of structural elements of the map, which allows estimating the degree of variability of the form and content of the map during its creation and use. To formalize the stage of designing a digital map, criteria for choosing a digital environment are proposed. The result of the study are provisions that reveal the structural and functional apparatus of the digital map in verbal and formal representations.


ACKNOWLEDGEMENTS The author thanks Doctor of Technical Sciences, Professor D.V. Lisitsky for valuable recommendations when conducting the research and writing this article.

REFERENCES 1. Lisitskii DV. Kartografiya v epokhu informatizatsii: novyye zadachi i vozmozhnosti [Cartography in the era of informatization: new problems and possibilities]. *Geography and Natural Resources*. 2016;4: 22–29 (In Russian). DOI:10.1134/S187537281604003X.

2. Karpik AP, Lisitskii DV. Perspektivy razvitiya geodezicheskogo i kartograficheskogo proizvodstva i novaya paradigma geoprostranstvennoy deyatelnosti [Prospects for the development of geodetic and cartographic production and a new paradigm of geospatial activity]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(2): 19–29. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-19-29.
3. Andriuhina JuN, Bugakov PJu, Kas'janova EL, et al. *Cifrovaja kartografija* [Digital cartography]. Lisickij DV. (ed.). Novosibirsk: SSUGT, 2023. 442 p. (In Russian).
4. Yuhao K, Gao S, Roth RE. Artificial Intelligence Studies in Cartography: A Review and Synthesis of Methods, Applications, and Ethics. *Cartography and Geographic Information Science*. 2024;51(4): 599–630. DOI:10.1080/15230406.2023.2295943.
5. Harrie L, Touya G, Oucheikh R, et al. Machine learning in cartography. *Cartography and Geographic Information Science*. 2024;51(1): 1–19. DOI:10.1080/15230406.2023.2295948.
6. Talipova L, Grebenyuk E, Ogurtsov G, et al. Perspectives of Interactions CAD and GIS Systems. *Proceedings of International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering – 2022*. Cham: Springer; 2022;291: 449–464. DOI:10.1007/978-3-031-14623-7_39.
7. Saganiak K, Buketov V. Integrating mining software, CAD, and GIS technologies for enhanced 3D geological mapping and visualization. *E3S Web of Conferences*. 2024;567: 01021. DOI:10.1051/e3sconf/202456701021.
8. Poshivaylo YG. Analiz strukturnykh elementov tsifrovoy temacheskoy karty [Analysis of structural elements of a digital thematic map]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVI International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 1(2). Novosibirsk: SSUGT; 2020: 62–67. (In Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2020-1-2-62-67.
9. Katsko SYu. Neogeografiya i kartografiya [Neogeography and cartography]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of IX International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 2. Novosibirsk: SSGA, 2013: 102–106. (In Russian).
10. Samsonov TE. Mul'timasshtabnoye kartografirovaniye — novoye napravleniye kartografii [Multiscale mapping — a new direction in cartography]. *Collection of articles "Modern Geographic Cartography"*. Lurie IK, Kravtsova VI. (eds.). Moscow: DATA+; 2012: 21–35 (In Russian).
11. Krylov SA. Avtomatizatsiya otbora obshchegeograficheskikh ob'yektov pri sozdanii mul'timasshtabnykh kart [Automation of selection of general geographic objects when creating multiscale maps]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVII International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2021: 178–183. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2021-1-178-183.
12. Feshchenko AP, Krylov SA. Printsipy sozdaniya i razmeshcheniya podpisov naselennykh punktov na mul'timasshtabnoy karte [Principles of creating and placing signatures of settlements on a multi-scale map]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XIX International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 1(2). Novosibirsk: SSUGT; 2023: 86–93. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-2-86-93.
13. Viaña R, Magillo P, Puppo E. Multi-Scale Geographic Maps. *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2005: 101–115. DOI:10.1007/3-540-26808-1_6.
14. Demidenko AG, Kirichenko AS, Kruzhkov AE. Tekhnologiya avtomatizirovannoy generalizatsii dlya sozdaniya mul'timasshtabnykh kart [Automated Generalization Technology for Multiscale Mapping]. *Geoprosfi*. 2019;6: 16–19. (In Russian).
15. Samsonov TE. Avtomatizirovannoye sovmeshcheniye tsifrovoy modeli rel'yefa i vektornykh dannykh o gidrograficheskoy seti [Automated combination of digital elevation model and vector data on hydrographic network]. *Proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference Geoinformation mapping in the regions of Russia*. Voronezh: Cifrovaja poligrafija; 2020: 294–301. (In Russian).
16. Shurygina AA, Samsonov TE. Avtomatizirovannoye raspoznavaniye regul'yarnykh, radial'nykh i kol'tsevykh struktur v konfiguratsii ulichno-dorozhnoy seti naselennykh punktov [Automated recognition of regular, radial and ring structures in the configuration of the street and road network of populated areas]. *Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS"*. Moscow: Moscow University Press, 2020. Vol. 26(1): 410–420. (In Russian). DOI:10.35595/2414-9179-2020-1-26-410-420.

17. Samsonov TE, Prokhorova EA. Generalizatsiya transportnykh setey pri multimasshtabnom kartografirovanii [Generalization of Transport Networks for Multiscale Mapping]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2019;1: 107–117. (In Russian). DOI:10.31857/S2587-556620191107-117.
18. Brovko EA, Sofinov PE. Progressivnyye metody avtomatizirovannoy generalizatsii tsifrovogo kartograficheskogo izobrazheniya v protsesse gosudarstvennogo topograficheskogo monitoringa [Progressive methods of automated generalization of digital cartographic images in the process of state topographic monitoring]. *Collection of abstracts of the All-Russian scientific conference: International Year of Maps in Russia: Uniting Space and Time*. Moscow: MSU; 2016: 40–41. (In Russian).
19. Ajdacka I, Karsznia I. Verifying and improving map specifications of river network selection for automatic generalization of small-scale maps. *Polish Cartographical Review*. 2022;54: 75–91. DOI:10.2478/pcr-2022-0006.
20. Lisitskii DV, Osipov AG, Savinykh VN. Tsifrovoy dvoynik territorii i metody geokognitivnogo modelirovaniya [Digital twin of the territory and methods of geocognitive modeling]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVIII International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 206–212. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.

AUTHOR Yaroslava G. Poshivaylo

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Department of Cartography and Geoinformatics, Institute of Geodesy and Management
PhD in Engineering, Associate Professor
 0000-0002-1945-442X

Submitted: January 22, 2025. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Оценка устойчивого развития земель урбанизированных территорий на примере городского округа город Тюмень

К.Н. Айнуллина¹✉, О.В. Богданова¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

✉ ainullinakarina@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Айнуллина К.Н., Богданова О.В. Оценка устойчивого развития земель урбанизированных территорий на примере городского округа город Тюмень // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 82–92. DOI:10.30533/GiA-2025-015.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА земли урбанизированных территорий, устойчивое развитие территорий, городской округ, репрезентативные показатели

АННОТАЦИЯ Мировой процесс урбанизации трансформирует среду жизнедеятельности человека. Это касается экологии, экономического благосостояния, социальной, транспортной, инженерной инфраструктуры, пространственной организации территорий. Для обеспечения комфортных и безопасных условий проживания населения Правительством РФ поставлена первоочередная задача — достижение устойчивого и сбалансированного развития территорий. Вообще, под устойчивым развитием понимается баланс экономических, экологических и социальных факторов, которые должны быть учтены в документах территориального планирования. Однако на сегодняшний день затруднительно в таких документах проследить принцип учета сбалансированности указанных факторов. Для исключения ошибочных управленческих решений необходим инструмент, который сможет дать системный анализ происходящих процессов. Таким инструментом можно считать оценку устойчивого развития земель урбанизированных территорий, которая позволяет системно проанализировать состояние рассматриваемого объекта. Целью настоящего исследования, в ходе которого были использованы методы анализа и синтеза, статистические методы, метод интерполяций, является апробация методики оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий. Основными результатами явились установление репрезентативных показателей, оценка уровня устойчивого развития земель урбанизированных территорий на примере городского округа город Тюмень.

1 Введение

Город как объект научного познания давно вышел за свои административные границы. Он трансформировался в более динамичную и сложную единицу — урбанизированные территории, которые характеризуются различными правовыми режимами, сложноустроенными экономическими, социальными, инженерными и другими связями.

Как и территория, земля трансформируется, усложняются ее связи. На современном этапе развития человечества формальное восприятие земель населенных пунктов как места для проживания людей исчерпало себя. Это объясняется тем, что между территорией и землей существует прямо пропорциональная зависимость, процесс урбанизации напрямую отразился и на землях. Соответственно, в современных условиях необходимо применять термин «земли урбанизированных территорий», под которым следует понимать территории городских округов или городских поселений как динамичную природно-антропогенную, социально-экономическую систему, состоящую из элементов с различными правовыми режимами [1].

На данный момент земли урбанизированных территорий являются основным пространственным базисом размещения населения, ввиду чего повышается их роль, изменяется их первоначальное состояние, что приводит к экологическим проблемам; усложняется пространственная организация, которая ведет к диспропорции пространственного развития. Как показывает анализ стратегических документов, глобальной целью Правительства РФ является обеспечение устойчивого развития земель урбанизированных территорий. По мнению авторов, основным приоритетом поставленной цели служат рациональность использования земель урбанизированных территорий, эффективность системы земельно-имущественных отношений.

Для принятия научно обоснованных управленческих решений необходимо ввести такой инструмент оценки, который смог бы дать комплексное представление о процессах, происходящих на заданной территории в определенный период, с возможностью внесения изменений в документы территориального планирования местного уровня [2]. Одним из эффективных в этом отношении инструментов является оценка устойчивого развития земель урбанизированных территорий, определяющая уровень такого развития и выступающая в роли интегрированной информации о состоянии рассматриваемой системы. По результатам данной оценки возможны принятие научно обоснованных управленческих решений и последующее прогнозирование развития территорий, внесение изменений в документы территориального планирования муниципального уровня.

2 Материалы и методы

В рамках исследования в области оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий авторы использовали методы анализа, синтеза, структуризации данных, математической статистики, расчетно-конструктивные методы. Источниками исходных данных по формированию репрезентативных показателей послужили База данных показателей муниципальных образований (Росстат)¹, отчеты глав муниципальных образований, геоинформационный портал «Национальная система пространственных данных»², официальные данные Росгидромета³ и Росреестра⁴.

1 База данных показателей муниципальных образований / Росстат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst/> (дата обращения: 07.09.2024).

2 Портал пространственных данных «Национальная система пространственных данных». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nspd.gov.ru> (дата обращения: 07.09.2024).

3 Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет): официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru> (дата обращения: 07.09.2024).

4 Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр): официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosreestr.gov.ru> (дата обращения: 07.09.2024).

3 Результаты и обсуждение

Исследования в области устойчивого развития территорий ведутся с середины XX века, однако на сегодняшний день не разработан общепринятый подход к оценке устойчивого развития земель урбанизированных территорий. Проанализировав научные труды, посвященные данной проблеме [3, 4], можно заключить, что многие авторы используют индикативный подход. Данный подход является эффективным, так как позволяет дать детальную оценку происходящим процессам.

Результаты оценки устойчивого развития территорий (город, регион, страна), отраженные в статьях [5–10], не учитывают земельные ресурсы, фокусируя внимание на экономических, социальных и экологических факторах. Отметим также следующие недостатки анализируемых методик:

1. В большинстве методик отсутствует этап прогнозирования.
2. В них применяются весовые коэффициенты. Согласно общепринятой концепции устойчивого развития, экологические, экономические и социальные факторы развития должны быть в балансе. Исходя из данного довода, по мнению авторов, введение весовых коэффициентов нецелесообразно, так как все факторы в равной степени влияют на развитие земель урбанизированных территорий.
3. Не учитываются особенности урбанизированных территорий. Земли урбанизированных территорий представляют собой наиболее сложный объект исследования. Будучи системой, они состоят из множества элементов, которые можно разделить на экономические, социальные, природно-антропогенные (экологические), пространственно-организационные (инфраструктура, градостроительная среда, объекты земельно-имущественных отношений). Однако в оценке не учитываются последние элементы, которые в большей мере влияют на устойчивое развитие. С учетом изложенного определим, что для оценки уровня устойчивого развития территории, помимо экономических, экологических и социальных факторов, необходимо учесть пространственно-организационный фактор, который позволит определить уровень инфраструктурной обеспеченности, состояние градостроительной среды и земельно-имущественных отношений.
4. Применяются только статистические показатели.
5. Игнорируются показатели, характеризующие состояние земельных ресурсов как один из важных элементов урбанизированных территорий.

Для проведения оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий первоочередной задачей является определение показателей. Для обоснования выбора репрезентативных показателей был применен метод корреляционного анализа. Репрезентативными считались такие показатели, коэффициент корреляции которых удовлетворял следующему требованию: $|r_{xy}| > 0,70$. Установленные репрезентативные показатели, сгруппированные по факторам и критериям, приведены на рис. 1.

После отбора репрезентативных показателей и с учетом рассмотренных ранее недостатков подходов авторы предлагают алгоритм методики оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий (рис. 2) с включением пространственно-организационного фактора, который учитывает земельно-имущественные характеристики, а также характеристики градостроительной среды.

Представленный алгоритм включает в себя все этапы предложенной методики и позволяет наглядно систематизировать процесс оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий. Ранжирование полученных результатов оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий приведено в табл. 1.

Для апробации предложенной методики оценки устойчивого развития исследуем с ее помощью административный центр Тюменской области городской округ город Тюмень.

Таблица 1 ▼

Ранжирование результатов оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий

Table 1

Ranking of the results of the assessment of sustainable development of lands in urbanized areas

Зона	Диапазон значений, %
Неустойчивости	0–35,99
Устойчивости	36–50,99
Близкая к устойчивому развитию	51–65,99
Устойчивого развития	66–85,99
Интенсивного развития	86–100

РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМЕЛЬ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

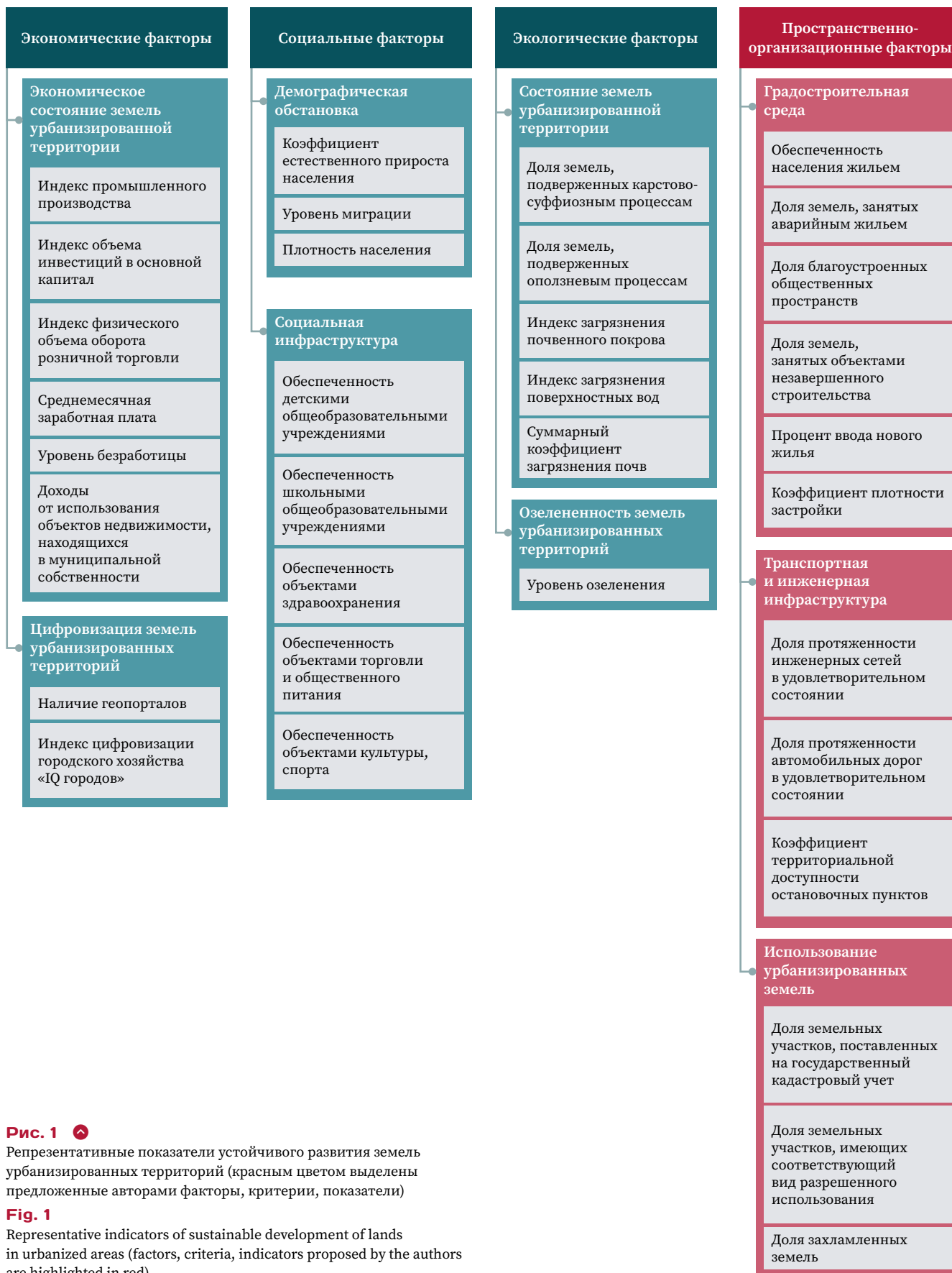


Рис. 1 Репрезентативные показатели устойчивого развития земель урбанизированных территорий (красным цветом выделены предложенные авторами факторы, критерии, показатели)

Fig. 1 Representative indicators of sustainable development of lands in urbanized areas (factors, criteria, indicators proposed by the authors are highlighted in red)

Рис. 2

Алгоритм методики оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий

Fig. 2

Algorithm of the methodology for assessing the sustainable development of lands in urbanized areas

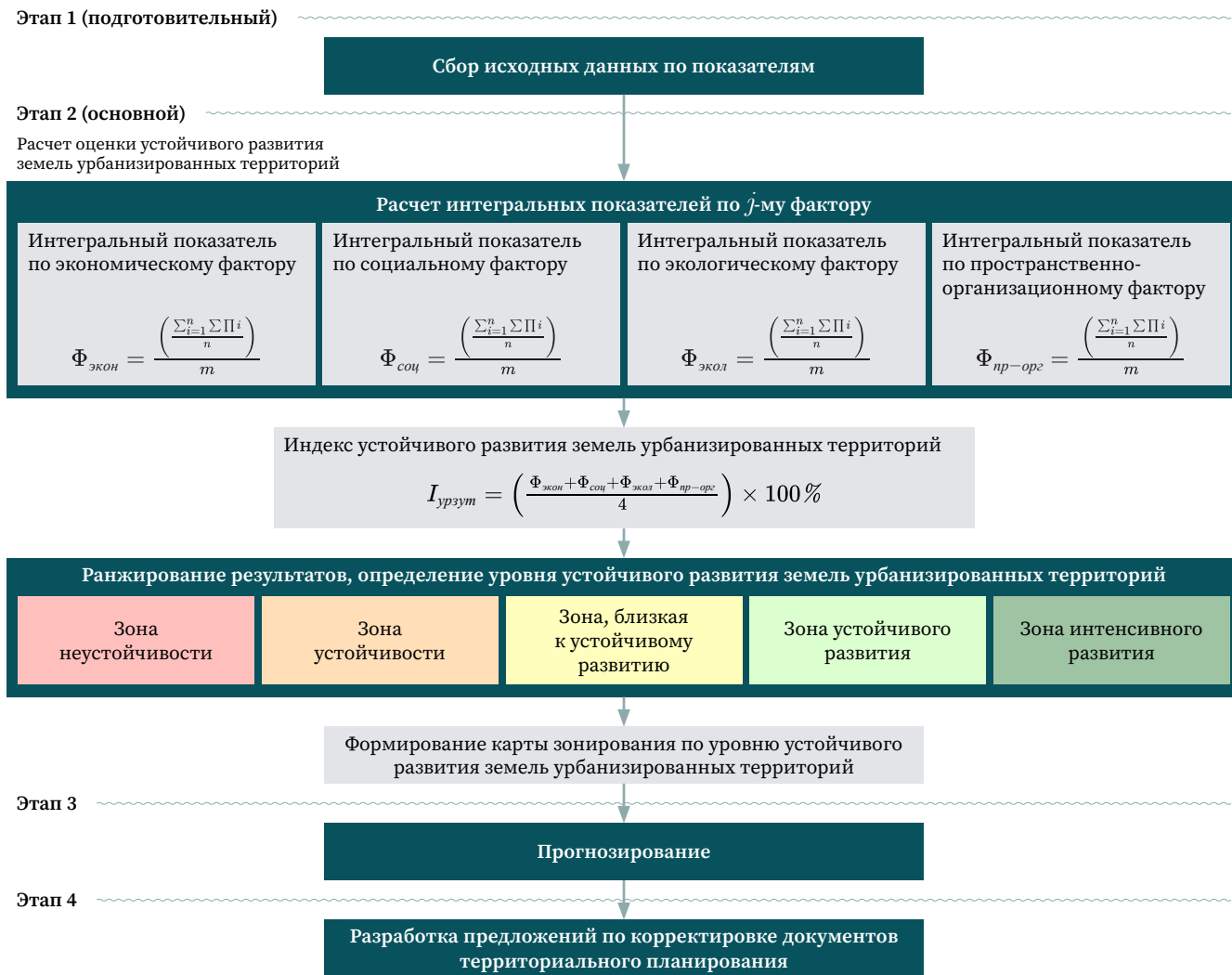
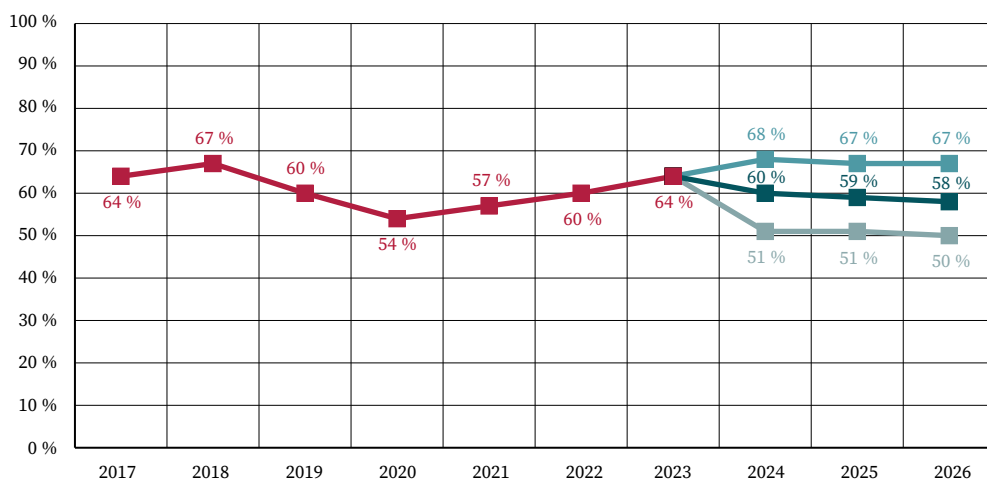


Рис. 3

Результаты расчета индекса устойчивого развития земель урбанизированных территорий на примере городского округа город Тюмень и прогноз на три года

Fig. 3

Results of calculating the index of sustainable development of lands of urbanized territories using the example of the urban district of Tyumen and a forecast for three years



Условные обозначения

- индекс устойчивого развития земель урбанизированных территорий
- прогноз (индекс устойчивого развития земель урбанизированных территорий)
- привязка низкой вероятности (индекс устойчивого развития земель урбанизированных территорий)
- привязка высокой вероятности (индекс устойчивого развития земель урбанизированных территорий)

В результате расчета индекса устойчивого развития земель урбанизированных территорий за период с 2017 по 2023 год по предложенной формуле (рис. 2) получены результаты, отраженные в виде графика на рис. 3. На основе этих данных был составлен прогноз на 2024, 2025, 2026 годы.

Проанализировав результаты индекса устойчивого развития земель урбанизированных территорий за 6 лет, можно сделать вывод, что в обозначенный период городской округ город Тюмень находится в зоне, близкой к устойчивому развитию. По результатам прогноза на три года будет наблюдаться уменьшение данного индекса. Для более детального анализа причин такого уровня устойчивого развития земель урбанизированных территорий рассмотрим значения интегральных показателей по j -м факторам (рис. 4–7).


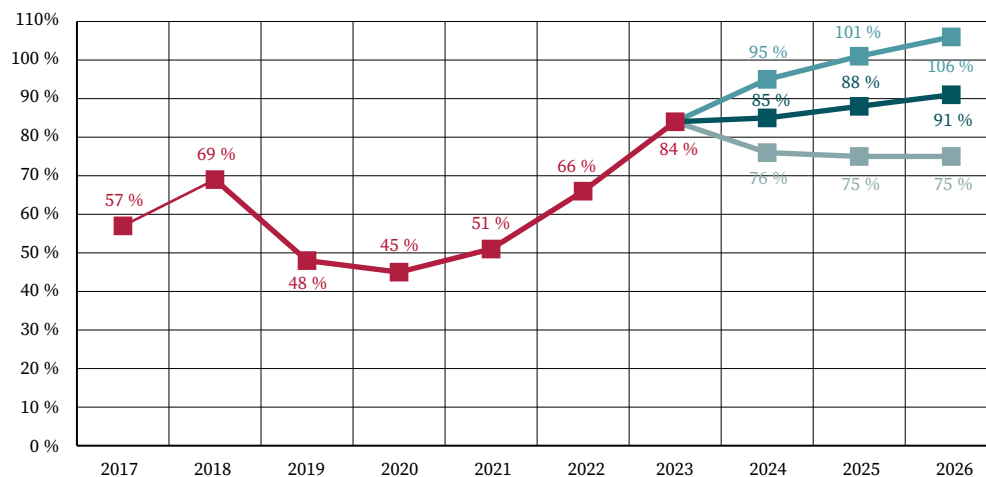
Рис. 4  Результаты расчетов интегральных показателей по экономическому фактору и прогноз на три года

Fig. 4 Results of calculations of integral indicators for the economic factor and forecast for three years



Условные обозначения

- интегральный показатель по экономическому фактору
- прогноз (интегральный показатель по экономическому фактору)
- привязка низкой вероятности (интегральный показатель по экономическому фактору)
- привязка высокой вероятности (интегральный показатель по экономическому фактору)


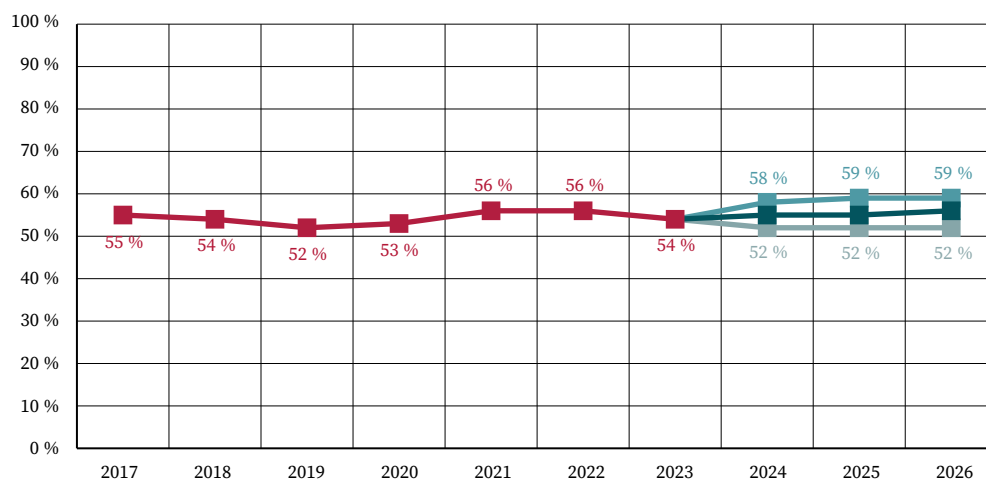
Рис. 5  Результаты расчетов интегральных показателей по экологическому фактору и прогноз на три года

Fig. 5 Results of calculations of integral indicators for the environmental factor and forecast for three years



Условные обозначения

- интегральный показатель по экологическому фактору
- прогноз (интегральный показатель по экологическому фактору)
- привязка низкой вероятности (интегральный показатель по экологическому фактору)
- привязка высокой вероятности (интегральный показатель по экологическому фактору)


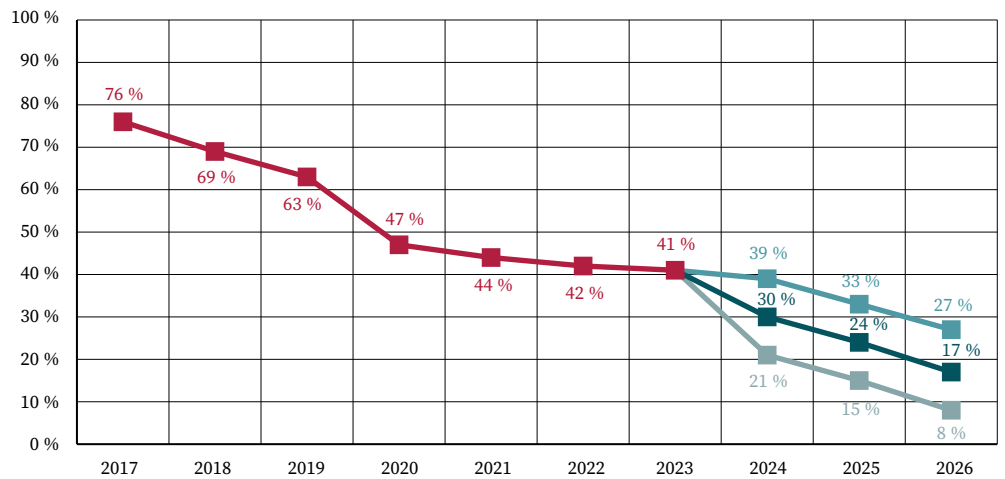
Рис. 6 
 Результаты расчетов интегральных показателей по социальному фактору и прогноз на три года

Fig. 6
 Results of calculations of integral indicators for the social factor and forecast for three years



Условные обозначения

- интегральный показатель по социальному фактору
- прогноз (интегральный показатель по социальному фактору)
- привязка низкой вероятности (интегральный показатель по социальному фактору)
- привязка высокой вероятности (интегральный показатель по социальному фактору)


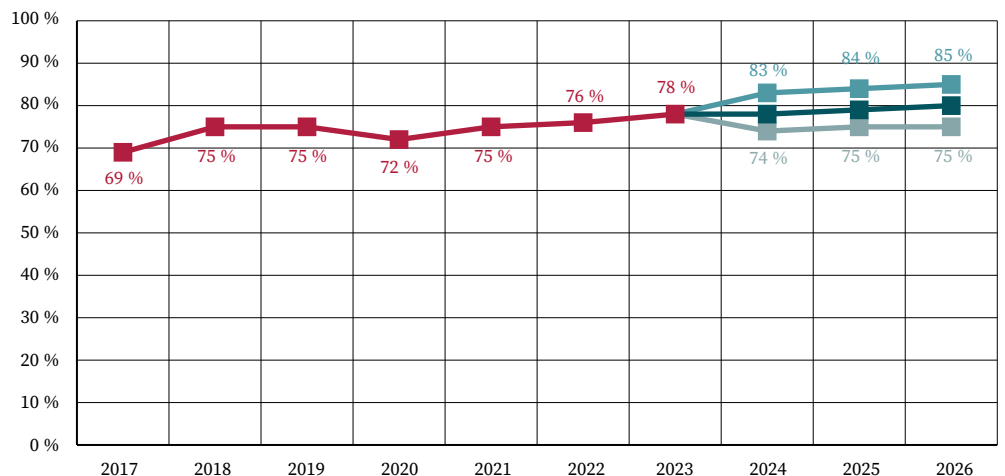
Рис. 7 
 Результаты расчетов интегральных показателей по пространственно-организационному фактору и прогноз на три года

Fig. 7
 Results of calculations of integral indicators for the spatial-organizational factor and forecast for three years



Условные обозначения

- интегральный показатель по пространственно-организационному фактору
- прогноз (интегральный показатель по пространственно-организационному фактору)
- привязка низкой вероятности (интегральный показатель по пространственно-организационному фактору)
- привязка высокой вероятности (интегральный показатель по пространственно-организационному фактору)

Таким образом, предложенные интегральные показатели по *j*-м факторам позволяют определить, какие именно аспекты влияют на дальнейшее развитие городского округа город Тюмень не только в ретроспективе, но и в прогнозе. Для обеспечения устойчивого развития городского округа город Тюмень необходимы следующие мероприятия, решающие наиболее острые проблемы:

1. В городе наблюдаются уменьшение площади зеленых насаждений, все большая загазованность воздуха. Для обеспечения устойчивого развития земель урбанизированных территорий необходимо внести в генеральный план изменения, способствующие увеличению озелененных зон.
2. Наиболее острая проблема наблюдается у интегрального показателя по социальному фактору. На значение данного показателя повлияли показатели демографической обстановки вследствие пандемии коронавирусной инфекции COVID-19. Помимо демографических показателей

наблюдается напряженная ситуация с социальной инфраструктурой (с дошкольными и школьными общеобразовательными учреждениями) в связи с ростом населения, высокими темпами строительства нового жилья. Для обеспечения устойчивого развития земель урбанизированных территорий необходимо предусмотреть в генеральном плане строительство объектов социальной инфраструктуры.

3. Несмотря на высокие результаты интегрального показателя по пространственно-организационному фактору, в городе Тюмени наблюдается рост такого показателя, как доля захламленных земель, что также отрицательно влияет на устойчивое развитие. Поэтому необходимо предусмотреть мероприятия по устранению данной проблемы.

Предложенная методика позволяет оценить уровень устойчивого развития земель урбанизированных территорий по видам факторов, влияющих на формирование общего конечного показателя. Полученные данные формируют тренд для расчета прогнозных значений интегральных показателей по j -м факторам.

4 Выводы

В результате исследования были определены репрезентативные показатели устойчивого развития земель урбанизированных территорий, предложена методика оценки устойчивого развития земель урбанизированных территорий, которая апробирована на примере городского округа город Тюмень. Данная методика направлена на достижение высокого уровня устойчивого развития муниципальных образований по трем основным факторам: экологическому, экономическому, социальному. Учитывается также пространственно-организационный фактор, что, по мнению авторов, является основным при оценке земель городских территорий.

Разработанная методика позволит оценить уровень устойчивого развития земель урбанизированных территорий, составить прогноз на основе полученных результатов, сформировав таким образом научный подход по обоснованию внесения изменений в документы территориального планирования городских округов и городских поселений. Прогнозные значения могут являться основанием для формирования стратегий социально-экономического развития муниципальных образований и других документов разного уровня.


В дальнейших исследованиях необходимо создать программный модуль в QGIS для автоматизированного расчета индекса устойчивого развития земель урбанизированных территорий и построения тематических карт. Оценка устойчивого развития земель урбанизированных территорий позволит определить уровень такого развития и своевременно скорректировать управленческие решения.

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Черных Е.Г., Айнуллина К.Н. Принципы идентификации урбанизированных территорий и индикаторы их устойчивого развития // Геодезия и картография. 2023. Т. 84. № 6. С. 50–58. DOI:10.22389/0016-7126-2023-996-6-50-58.
2. Карпик А.П., Осипова А.Г., Мурзинцев П.П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе: монография. Новосибирск: СГГА, 2010. 280 с.
3. Деневизюк Д.А. Устойчивое развитие города: вопросы теории, оценка и основные приоритеты: на примере города Махачкалы: дис. ... канд. экон. наук. Махачкала, 2006. 164 с.
4. Третьякова Е.А., Миролюбова Т.В., Мыслякова Ю.Г. и др. Методический подход к комплексной оценке устойчивого развития региона в условиях экологизации экономики // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2018. Т. 17. № 4. С. 651–669. DOI:10.15826/vestnik.2018.17.4.029.
5. Голубева А.С., Волков А.Р., Черникова С.А. и др. Индикативный и комплексный подходы к оценке устойчивого развития региона на примере города Санкт-Петербурга // Креативная экономика. 2022. Т. 16. № 2. С. 757–770.

6. Глинский В.В., Гришакова А.А., Серга Л.К. Технологии классификации данных в оценке уровня устойчивого развития территорий // Вопросы статистики. 2023. Т. 30. № 5. С. 11–27.
7. Бородин С.Н. Модель оценки устойчивого развития региона на основе индексного метода // Экономика региона. 2023. Т. 19. № 1. С. 45–59. DOI:10.17059/ekon.reg.2023-1-4.
8. Самохин А.В., Мясников С.А. Методика измерения устойчивого развития городов России: ESG-индекс ВЭБ.РФ // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. 2023. Т. 58. № 1. С. 232–255. DOI:10.55959/MSU0130-0105-6-58-1-11.
9. Коваленко Е.Г., Мурашова Н.В. Оценка устойчивости социально-экономического развития сельских муниципальных районов Нижегородской области // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2021. Т. 3. № 36. С. 178–182. DOI:10.26140/anie-2021-1003-0041.
10. Устойчивое развитие городов: коллективная монография / под ред. К.В. Папенова, С.М. Никонорова, К.С. Ситкиной. М.: Экономический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019. 288 с.

АВТОРЫ **Айнуллина Карина Наилевна**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
кафедра геодезии и кадастровой деятельности,
Институт сервиса и отраслевого управления
 0000-0002-6139-1864

Богданова Ольга Викторовна

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

Поступила 13.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Assessment of sustainable land development in urbanized areas: a case study of the Tyumen urban district

Karina N. Ainullina¹✉, Olga V. Bogdanova¹

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
✉ ainullinakarina@yandex.ru

CITATION Ainullina KN, Bogdanova OV. Assessment of sustainable land development in urbanized areas: a case study of the Tyumen urban district. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 82–92. DOI:10.30533/GiA-2025-015.

KEYWORDS lands of urbanized territories, assessment of sustainable development of lands of urbanized territories, representative indicators, urban district

ABSTRACT The global urbanization process is transforming the human environment. This concerns ecology, economic well-being, social, transport, engineering infrastructure, spatial organization of territories. In order to ensure comfortable and safe living conditions for the population, the Government of the Russian Federation has set a priority task – to achieve sustainable and balanced development of territories. In a general sense, sustainable development is understood as a balance of economic, environmental and social factors that must be taken into account in territorial planning documents. However, today it is difficult to trace the principle of taking into account the balance of these factors in such documents. In order to exclude the management decisions taken, a tool is needed that can provide a systemic analysis of the processes taking place. This tool can be considered an assessment of the sustainable development of lands of urbanized territories, which allows for a systemic analysis of the state of the object under consideration. The purpose of this study is to test the methodology for assessing the sustainable development of lands of urbanized territories using the example of the urban district of the city of Tyumen. When writing the article, the methods of analysis and synthesis, statistical methods, and the interpolation method were used. The main results were the establishment of representative indicators, assessment of the level of sustainable development of lands in urbanized territories using the example of the urban district of the city of Tyumen.

REFERENCES 1. Chernyh EG, Ajnullina KN. Principy identifikacii urbanizirovannyh territorij i indikatory ih ustojchivogo razvitiya [Principles of urbanized territories identification

- and indicators of their sustainable development]. *Geodesy and Cartography*. 2023;84(6): 50–58. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2023-996-6-50-58.
2. Karpik AP, Osipov AG, Murzintsev PP. *Upravlenie territoriei v geoinformatsionnom diskurse* [Territory management in geoinformation discourse] [monograph]. Novosibirsk: SSGA; 2010. 280 p. (In Russian).
 3. Denevizjuk DA. *Ustojchivoe razvitie goroda: voprosy teorii, ocenka i osnovnye priorityety: na primere goroda Mahachkaly* [Sustainable development of the city: theory, assessment and main priorities: using the example of the city of Makhachkala] [dissertation]. Makhachkala, 2006. 164 p. (In Russian).
 4. Treťjakova EA, Miroljubova TV, Mysljakova JuG, et al. Metodicheskiy podhod k kompleksnoj ocenke ustojchivogo razvitiya regiona v usloviyah jekologizacii jekonomiki [Methodical approach to the complex assessment of the sustainable region development in the condition of greening the economy]. *Bulletin of UrFU. Series Economics and Management*. 2018;17(4): 651–669. (In Russian). DOI:10.15826/vestnik.2018.17.4.029.
 5. Golubeva AS, Volkov AR, Chernikova SA, et al. Indikativnyy i kompleksnyy podkhody k otsenke ustoychivogo razvitiya regiona na primere goroda Sankt-Peterburga [Indicative and integrated approaches to assessing the regional sustainable development on the example of the city of St. Petersburg]. *Creative Economy*. 2022;16(2): 757–770. (In Russian).
 6. Glinskiy VV, Grishakova AA, Serga LK. Tekhnologii klassifikatsii dannykh v otsenke urovnya ustoychivogo razvitiya territoriy [Data classification technologies in assessing the level of sustainable development of territories]. *Voprosy statistiki*. 2023;30(5): 11–27. (In Russian).
 7. Borodin SN. Model' ocenki ustojchivogo razvitiya regiona na osnove indeksnogo metoda [A model for assessing regional sustainable development based on the index method]. *Economy of Regions*. 2023;19(1): 45–59. (In Russian). DOI:10.17059/ekon.reg.2023-1-4.
 8. Samokhin AV, Myasnikov SA. Metodika izmereniya ustoychivogo razvitiya gorodov Rossii: ESG-indeks VEB.RF [Methodology for measuring sustainable development of Russian cities: esg index of the VEB.RF]. *Lomonosov Economics Journal*. 2023;58(1): 232–255. (In Russian). DOI:10.55959/MSU0130-0105-6-58-1-11.
 9. Kovalenko EG, Murashova NV. Ocenka ustojchivosti social'no-jekonomicheskogo razvitiya sel'skih municipal'nyh rajonov Nizhegorodskoj oblasti [Sustainability assessment of socio-economic development of rural municipal areas of Nizhny Novgorod Region]. *Azimut of Scientific Research: Economics and Administration*. 2021;3(36): 178–182. (In Russian). DOI:10.26140/anie-2021-1003-0041.
 10. *Ustojchivoe razvitie gorodov* [Sustainable urban development] [monograph]. Papenov KV, Nikonorov SM, Sitkina KS. (ed.). Moscow: Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University; 2019. 288 p.

AUTHORS Karina N. Ainullina

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
 Department of Geodesy and Cadastral Activities, Institute of Service and Industry Management
 ID 0000-0002-6139-1864

Olga V. Bogdanova

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

Submitted: November 13, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Определение дешифровочных признаков проявлений эффузивной вулканической деятельности для выявления ее воздействия на территории

В.А. Мелкий¹✉, А.А. Верхотуров¹

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
✉ vamelkiy@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Определение дешифровочных признаков проявлений эффузивной вулканической деятельности для выявления ее воздействия на территории // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 93–107. DOI:10.30533/GiA-2025-016.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА эффузивный вулканизм, дистанционное зондирование, дешифрирование космических снимков, риск, геоинформационное картографирование

АННОТАЦИЯ Цель работы — выявление характерных для лавовых потоков базальтового и андезитобазальтового состава дешифровочных признаков проявлений эффузивной деятельности вулканов. В статье приведены данные исследования распространения вулканогенных отложений на территории, прилегающей к эруптивному центру. Эффузивная деятельность характерна для вулканов, магматический расплав которых имеет базальтовый или андезитобазальтовый состав. Тип эффузивных извержений зависит от газонасыщенности магмы: более вязкий, насыщенный оксидом кремнезема расплав взрывается сильнее. Относительно спокойное истечение жидкой базальтовой магмы через край кратера свойственно гавайскому и трещинному типам извержений. С увеличением кремнекислотности магмы взрывной разброс происходит с большей силой, на поверхности потоков образуются конусы. Извержения андезитобазальтовой магмы чаще всего могут быть отнесены к стромболианскому типу, при котором вулкан периодически выбрасывает бомбы, лапилли и пеплы песчаной и более мелких размерностей. Для работы использовались материалы полевых исследований, космические снимки низкого и среднего пространственного разрешения, полученные при съемках со спутников Landsat, «Канопус», Sentinel, данные цифровой аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов. Аэрокосмические снимки позволили достаточно точно проанализировать изменения в состоянии поверхностей лавовых потоков различного состава. В результате дешифрирования проявлений вулканической деятельности эффузивного

типа создан классификатор дешифровочных признаков этих проявлений и выработаны критерии их формализации для автоматизированного дешифрирования. Определение проявлений деятельности, характерной для того или иного вулкана, позволяет отнести его очаги к типу М (мантийному) или К (коровому), установить тектоническое положение постройки и геодинамический режим, которыми определяется опасность эффузивных и эксплозивных извержений. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов. Результаты дешифрирования аэрокосмических снимков, отражающих проявления эффузивной деятельности вулканов, позволили определить основные дешифровочные признаки этих проявлений и выявить критерии их формализации для дальнейшей автоматизации процесса их распознавания, определения уровня вулканопасности и планирования землепользования.

1 Введение

В процессе полевых исследований эффузивной деятельности ряда вулканов Курильских островов и Камчатки были накоплены материалы о проявлениях, наиболее характерных для поверхностей изливающихся лавовых потоков. Анализ состояния поверхностей, а также данные, полученные при наблюдениях другими исследователями эффузивных извержений различных вулканов Земли, позволил составить относительно ясную картину внешнего облика проявлений, свойственных поверхности лавовых потоков определенного петрохимического состава, характерных для вулканов типов К (корового) или М (мантийного), зависящих от геодинамического режима тектонической структуры, глубинности и масштабности очагов^{1,2}.

Характеру проявлений эффузивной деятельности вулканов посвящено большое количество работ^{3,4} [1, 2]. Основная опасность от эффузивной вулканической деятельности — покрытие территории лавовыми потоками. За последнюю тысячу лет распространение потоков лавы на любом квадратном километре поверхности Земли происходит в среднем один раз в 720 лет⁵. Вероятность этого возрастает с приближением территории к рифтовым зонам и островодужным системам, где лавовые потоки представляют угрозу как для жизни, так и для имущества людей.

2 Материалы и методы

В качестве материала для выполнения оценочных работ послужили доступные снимки с космических аппаратов Landsat и Sentinel-2, различающиеся техническими характеристиками, в том числе различным набором каналов

-
- 1 Сывороткин В.Л., Русинова С.В., Дриль С.И. Роль геодинамического режима в формировании четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 1990. № 5. С. 91–96.
 - 2 Melkiy V.A., Osipenko A.B., Rostovtseva Yu.V. A Model of the Earth's Crust Evolution in the Pacific-Type Island Arcs Based on Study of the Fe-Ti-Oxides // Abstracts European Union of Geosciences (EUG 9). Strasbourg, France, 23–27 March 1997. Terra Nova. 1997. Vol. 9. P. 475.
 - 3 Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.
 - 4 Певзнер М.М., Мелекесцев И.В., Волынец О.Н. и др. Южный Черпук и Северный Черпук — крупнейшие голоценовые моногенные вулканические формы Срединного хребта Камчатки (Россия) // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 22–32.
 - 5 Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдоналд Г.А. и др. Геологические стихии / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 439 с.

среднего пространственного разрешения систем, за период с 1980 по 2024 год, разномасштабные топографические карты, цифровая модель рельефа SRTM (англ. Shuttle Radar Topography Mission). Для работы использовались снимки среднего пространственного разрешения (10–100 м по ГОСТ Р 59478-2021), которые пригодны для создания моделей и картографических изображений масштабов 1 : 50 000 – 1 : 150 000. Разрешение этих изображений при условии хорошего качества и в отсутствие облаков позволяет определить характер поверхности лавовых потоков.

В настоящее время при исследованиях лавовых потоков все чаще применяются хорошо изученные методы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов, которые предоставляют координатно- и высотно-привязанную информацию о состоянии поверхности с пространственным разрешением 0,02–0,07 м [3, 4].

Для анализа растровых изображений используется множество способов, позволяющих выявить текстурные особенности отдельных сегментов снимков [5]. В проведенном исследовании выполнялась подготовка космических снимков к обработке и дальнейшим преобразованиям посредством применения функционала ГИС: обработки растров, векторизации и определения пространственно-количественных показателей (рис. 1) [6].

Методологическая платформа моделирования любых процессов, протекающих в природно-техногенных системах, всегда базируется на знаниях предметной области изучаемых объектов. В настоящее время разработаны концепции, теоретические основы, технологические решения для геоинформационного обеспечения мониторинга застраиваемых земель [7], систем трубопроводного транспорта для совершенствования их безопасной эксплуатации [8], эффективного использования земельных ресурсов [9], экономически целесообразных способов сбора высокоточных данных [10]. Методология моделирования вулканической деятельности опирается на выявление признаков проявлений, свойственных извержениям разной энергетики, выраженных индексом explosивности (англ. Volcanic Explosivity Index, VEI) [11].


Рис. 1 
Технологическая схема подготовки и обработки материалов для ведения мониторинга территорий, подверженных воздействию эффузивных вулканов (по [6] с изменениями)

Fig. 1
Technological scheme of preparation and processing of materials for monitoring territories exposed to effusive volcanoes (according to [6] with changes)



3 Результаты и обсуждение

3.1 Эффузивная вулканическая деятельность и ее геодинамические условия

В рифтовых зонах линейные извержения происходят вдоль трещин, раскрывающихся во время сильных землетрясений, при этом изливаются горячие магматические расплавы ($T \geq 1600$ °C) щелочно-базальтового состава. Океанический рифтовый вулканизм представлен исландским типом, хотя он распространен в основном не в подводных, а в наземных условиях. Лучше всего изучены исторические эффузивные линейные извержения в Исландии^{6,7}.

Ярким проявлением эффузивной вулканической деятельности являются ареальные излияния лав. Ареальные эффузивные вулканические образования возникают в разломных зонах планетарного ранга и относятся к М-вулканам (мантийным). Как отмечает В.Л. Сывороткин, среди продуктов деятельности этих вулканов преобладают базальтоиды и андезитобазальты [12].

Эффузивный вулканизм также встречается в пределах океанических литосферных плит, где он образует отдельные острова или целые архипелаги в регионах с океанической литосферой. Наиболее изученным примером может служить цепь Гавайских островов в центральной части Тихого океана. Достаточно много действующих вулканов эффузивного типа располагается в стороне от рифтовых систем: в Атлантическом океане — острова Зеленого Мыса и Канарские, в Тихом — Галапагосские.

Заметную роль рифтогенез играет на ранних стадиях формирования островных дуг. Разломообразование сопровождается вертикальными смещениями по сбросам и надвигам, а также сдвигам. Системы разломов влияют на размещение хребтов слабого вулканизма эффузивного типа, который приводит к образованию лавовых плато⁸. В пределах Курильской островной дуги выделяется лавовое плато г. Фрегат на о. Кунашир. Вулканическая деятельность эффузивного типа проявляется также в континентальных рифтовых зонах. Крупноареальные базальтоидные ассоциации известны на севере Сибирской платформы и Главном поле траппов Декана.

Горячие потоки лавы, вышедшей из жерла, устремляются вниз по склонам, и на их поверхности образуется вязкая корка («кожа»), насыщенная газами (H_2S , CO, CO_2 , SO_2 , SO_3 , H_2O , H_2 и др.). Лава, текущая под «кожей», создает повышенное гидростатическое давление и время от времени разрывает корку, высоко приподнимая ее в виде сводов.

Активнейшей территорией на Земле, подверженной эффузивной вулканической деятельности, является остров Гавайи, состоящий из пяти слитых вместе крупных щитовых вулканов, в том числе Мауна-Лоа и Килауэа. Вулкан Мауна-Лоа (№ 332020⁹) представляет собой лавовый щит высотой до 4170 м, длиной 90 км и шириной 50 км, сложенный многочисленными лавовыми потоками мощностью в несколько метров. Вулкан проявляет активность в среднем каждые 3,5 года. Склоны его исключительно пологие. Центры извержений приурочены к местам пересечения главных систем продольных и поперечных разломов¹⁰.

6 Sapper K. Vulkankunde. Stuttgart: J. Engelhorn's Nachf., 1929. 300 p.

7 Thorarinsson S. The Lakigigar eruption of 1783 // Bulletin of Volcanology. 1969. Vol. 33. P. 910–921.

8 Сывороткин В.Л., Русинова С.В., Дриль С.И. Роль геодинамического режима в формировании четвертичных вулкаников Курильской островной дуги // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 1990. № 5. С. 91–96.

9 Siebert L., Simkin T., Kimberly P. Volcanoes of the World. 3rd ed. Berkeley: University of California Press, 2010. 568 p.

10 Mulliken K.M., Tilling R.I., Swanson D.A. Eruptions of Hawaiian Volcanoes – Past, Present, and Future / U.S. Geological Survey General Information Product 117. 2010. 67 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/gip/117/gip117.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).

На вершине Мауна-Лоа расположен обширный кратер обрушения, периметр и глубина которого периодически изменяются. Наиболее крупное извержение было отмечено в 1950 году. Объем изверженной лавы был оценен в 450 млн м³¹¹.

Извержения базальтовой лавы из кратеров или чаще всего из раскрывшихся трещин отличаются относительно спокойным излиянием. Лава жидкая, подвижная, легко отдающая содержащиеся в ней газы. Крупные лавовые потоки наблюдались на вулкане Мауна-Лоа в 1880–1881 годах, когда поток прошел 48 км, а в 1859 году горячая лава из трещины прошла до берега моря, удаленного на 50 км¹². Свободно текущий в начале излияния лавовый ручей очень быстро замедляет скорость с удалением от источника и покрывается вязкой коркой. Эта корка сминается, сдвигается текущей под ней лавой и застывает напоподобие тонкого покрова льда, под которым течет расплав.

Лавовые потоки даже на одном вулкане перемещаются с разной скоростью. На начальных стадиях извержения изливается наиболее горячая лава (типа пахо-эхэ), которая в дальнейшем, после выпадения некоторых минералов ранней высокотемпературной стадии кристаллизации, становится более кремнекислой, вязкой и хрупкой ('а'-лава)¹³. Скорость лавовых потоков может достигать 18 м/с. Поток Мауна-Лоа (о. Гавайи) в 1950 году достиг океана за 3 часа¹⁴. Расстояние, которое проходит лавовый поток, зависит от скорости и продолжительности извержения, наклона и вязкости потока (рис. 2¹⁵).

Рис. 2 ◀

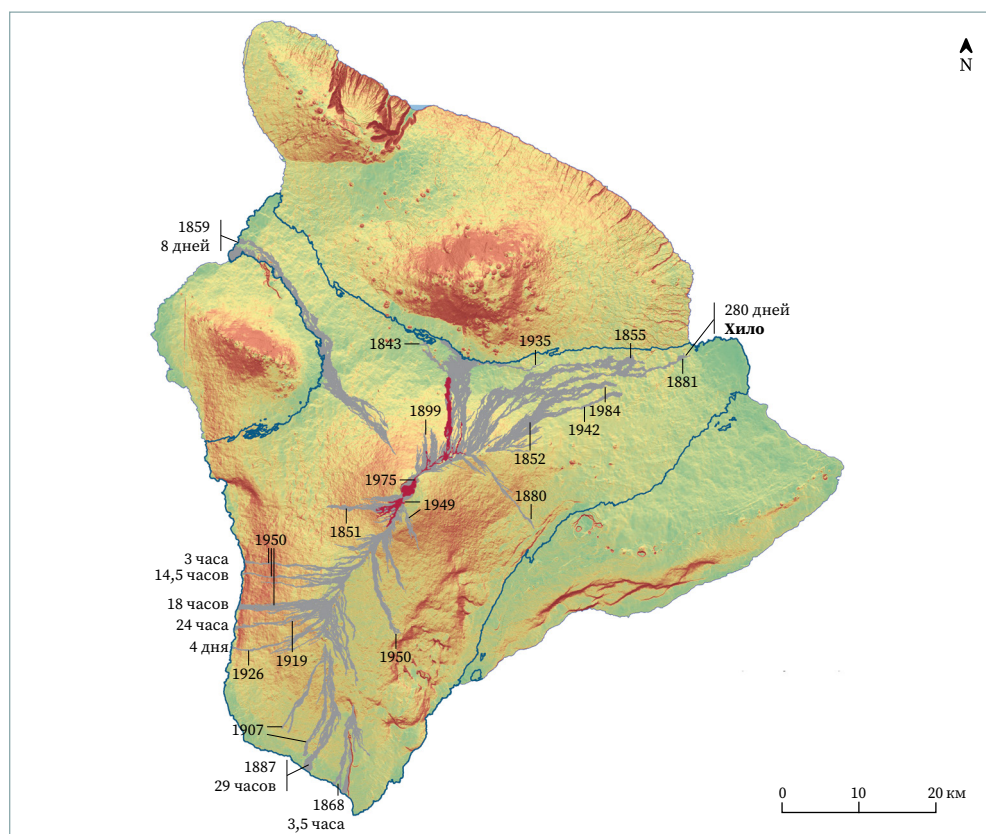
Схема времени прохождения лавовых потоков вулкана Мауна-Лоа с 1823 г. от трещины до берега океана (по данным сайта USGS с изменениями)

Fig. 2

Scheme of the passage time of lava flows from the Mauna Loa volcano after 1823 from crack to the ocean shore (by website USGS data with changes)

Условные обозначения

- граница Мауна-Лоа
- лавовые потоки
- лавовые потоки 2012



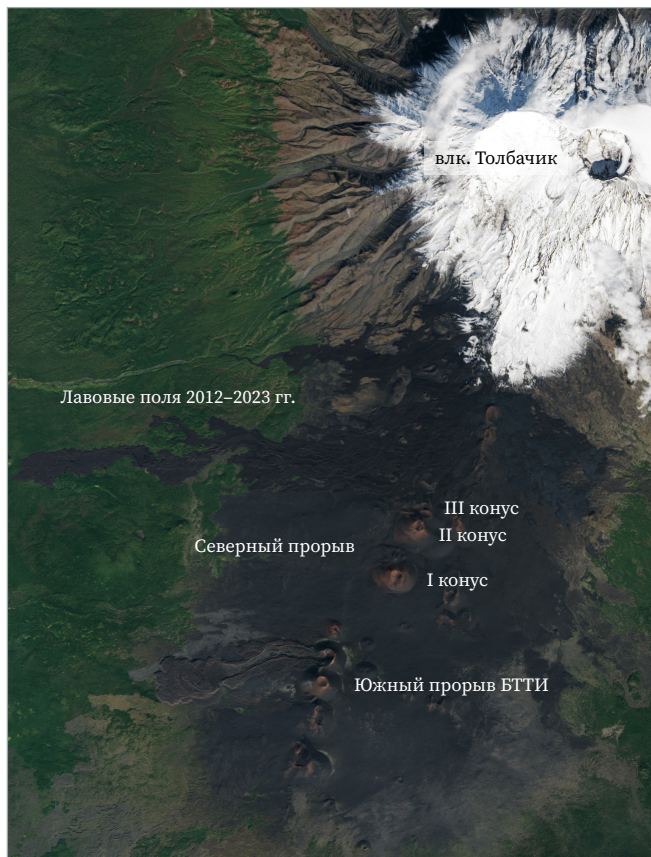
- 11 Lockwood J.P., Lipman P.W. Holocene eruptive history of Mauna Loa volcano // *Volcanism in Hawaii* / Decker R.W., Wright T.L., Stauffer P.H. (eds.). Washington: USG Printing Office, 1987. P. 509–535.
- 12 Global Volcanism Program, 2023. Report on Mauna Loa (United States) / Bennis K.L., Venzke E. (eds.) // *Bulletin of the Global Volcanism Network*. Vol. 48. No. 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://volcano.si.edu/showreport.cfm?doi=10.5479/si.GVP.BGVN202301-332020> (дата обращения: 15.10.2024).
- 13 Buchwaldt R. AA-Lava // Bobrowsky P.T. (ed). *Encyclopedia of Natural Hazards*. Dordrecht: Springer, 2013. P. 1.
- 14 Пичугина Т.Б. Метаморфозы лавы // *Вокруг света*. 2007. № 2. С. 6–14.
- 15 Slope map of Mauna Loa, including lava flows erupted since 1823 / USGS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.usgs.gov/media/images/map-post-1823-lava-flows-erupted-mauna-loa-gray-and-numbe> (дата обращения: 15.10.2024).

Рис. 3 

Лавовые поля вулкана Толбачик

Fig. 3

Lava fields of Tolbachik volcano



Наиболее известные примеры медленных эффузивных извержений отмечались на Везувии в периоды с 1891 по 1894 год и с 1895 по 1899 год¹⁶. Медленным извержениям предшествует энергичная деятельность с выбросами лавы, или терминальная эффузия. Из-за продолжающихся подземных толчков на склоне горы сверху вниз раскрывается трещина, открывающая новый выход лаве. Лава проникает в трещину и выходит на склоне горы на все более и более низких уровнях. Уровень лавы в жерле быстро опускается, а выбросы лавы (или эффузивная деятельность) в вершинном кратере прекращаются и переходят в сильные ритмичные выбросы парогазовой смеси.

Лава, обогащенная газом, дает преимущественно клинкерную неровную поверхность. Истечение лавы прекращается, нижняя часть трещины закрывается застывшей лавой. Уровень лавы в жерле снова начинает подниматься до тех пор, пока она снова не найдет выход в верхней части трещины. Так поэтапно снизу вверх закрывается трещина.

Извержения исландского типа наблюдались в ходе Большого Толбачинского трещинного извержения (БТТИ)¹⁷. Эффузивная деятельность начиналась с раскрытия трещины, вдоль которой из небольших кратеров били лавовые фонтаны, воздвигая невысокие конусы из шлаков и пепла. Эруптивная деятельность ограничивалась немногими кратерами, после чего начиналось истечение лавы. Подобного рода деятельность повторилась на вулкане Толбачик в 2012–2013 годах (рис. 3¹⁸).

В начале БТТИ на Северном прорыве наблюдалась трещина длиной до 300 м, в пределах которой действовали четыре жерла, выбрасывающие бомбы и шлаки. Лава впервые появилась в виде красного пятна размером 20×30 м. По данным С.А. Федотова, А.М. Чиркова, А.П. Хренова, на первом лавовом потоке Северного прорыва, когда фронт потока находился на расстоянии 3 км от конуса, эффективная вязкость составила 1×10^7 Пз. Еще через сутки вязкость, измеренная по продвижению фронта потока, составила 2×10^7 Пз.

3.2 Внешние проявления эффузивной деятельности и дешифровочные признаки

Эффузивная деятельность гавайского типа хорошо изучена на ранних стадиях БТТИ и извержения Толбачика в 2012–2013 годах. В результате эффузивных излияний формировались поверхности лавовых потоков, которые после застывания долгое время свидетельствуют о характере произошедших событий. Формы поверхности лавовых потоков в зависимости от вязкости и рода

16 Ритман А. Вулканы и их деятельность / пер. с нем. Л.Г. Кваша; под ред. и с предисл. В.И. Влодавца. М.: Мир, 1964. 437 с.

17 Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.

18 Activity Slows at Tolbachik (Landsat 8, Сканиер OLI, September 9, 2013). Landsat Image Gallery. Режим доступа: https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/82000/82066/klyuchevskaya_oli_2013252_lrg.jpg (дата обращения: 15.08.2024).

течения весьма различны. Образования на поверхности лавовых потоков, а также текстура рисунка отражают физические свойства лавы, которые зависят от химического состава. Преобладание характерных пластичных либо хрупких деформаций поверхностей позволяет выделить лавы пахоэхоэ (гладкие волнистые) и 'а'а (обломочные и шлаково-мелкоглыбовые). В случае излияния горячих потоков ($T \geq 1100 \text{ }^\circ\text{C}$) с небольшой вязкостью ($(1 \div 2) \times 10^4 \text{ Пз}$) скорость течения на небольшом расстоянии от изливающих конусов постоянна, при этом образуется относительно ровная поверхность, которая позволяет считать лаву гладкой волнистой (рис. 4а)¹⁹. Поверхности потоков определяются условиями кристаллизации текущей жидкости: формируются нитчатые, игольчатые, кружевные структуры, которые застывают, когда лопаются газовые пузырьки.

При увеличении крутизны склона течение ускоряется, затвердевшая поверхностная масса, образовавшаяся вследствие остывания, разрывается на плоские глыбы и превращается в плоскую плитообразную корку с грубой, часто рубчатой поверхностью. Лава несет эти пластины за собой, иногда опрокидывая их. При этом поверхность подвержена преимущественно хрупким разрушениям и соответствует реологическим свойствам плоскоглыбовой или пластинчатой лавы (рис. 4б)²⁰. Если под коркой потока скорость течения уменьшается, то глыбы в потоке образуют нагромождения и заторы.

Если движение замедляется еще до полного затвердения корки, то корка сдавливается в направлении течения и сминается. Только что образовавшиеся складки, особенно в середине потока, волочатся дальше и дугообразно

Рис. 4 ⬇

Поверхности лавы в потоках различной температуры вязкости

Fig. 4

Lava surfaces in flows of different viscosity temperatures

Гладкая волнистая лава влк. Толбачик (фото Е.В. Касперского) / Smooth wavy lava of Tolbachik volcano (photo by E.V. Kaspersky)



Плоскоглыбовая плитчатая или пластинчатая лава вулкана Фарадальсфьядль, Исландия (фото Т. Грипачевска) / Flat-headed slab or plate lava of volcano Fagradalsfjall, Iceland (photo by T. Gripachevska)



Канатная лава на влк. Толбачик (фото А. Петруся) / Rope lava on Tolbachik volcano (photo by A. Petrus)



Глыбовая лава на влк. Мауна-Лоа (фото Мастерок.жж.рф) / Blocky lava on Mauna Loa volcano (Photo by masterok.livejournal.com)



19 Касперский Е.В. Толбачик. Сжечь все. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eugene.kaspersky.ru/2013/04/05/tolbachik-szhech-vsyo> (дата обращения: 15.08.2024).
 20 Norén Anders. Has Iceland entered a new volcanic era? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all-things-nordic.com/2023/07/27/has-iceland-entered-a-new-volcanic-era/> (дата обращения: 15.08.2024).

изгибаются. Так образуются известные канатные лавы. «Канаты» тем толще, чем больше вязкость «кожи» (рис. 4в)²¹.

Из вязких лав газы не могут выделиться так легко, и расплав до затвердевания остается относительно богатым газом. В этом случае возникают формы поверхности, которые обычно объединяют в понятие глыбовой лавы. Настоящая глыбовая лава образуется только в момент излияния вязких лав, которые быстро покрываются толстой коркой. Фронт потоков, затвердевая, растрескивается, и сквозь трещины выдавливается лава, застывая в причудливых формах в виде крупных глыб, лепешкообразных и шарообразных тел (рис. 4г)^{22,23} [13]. Специфические формы базальтовых лавовых покровов, наблюдавшиеся в Толбачинском долу при БТТИ, обусловлены сложными реологическими свойствами магм. Такими формами, в частности, являются ступени лавовых потоков и пещеры в них²⁴.

При снижении температуры из расплава выпадают оливины, пироксены, ульвешпинелиды: увеличивается вязкость лавы, возрастает способность к хрупким разрушениям, и, как следствие, ее можно отнести к типу 'а'. Различные условия течения лавовых потоков приводят к образованию разнообразных форм на их поверхности. Наблюдалось некоторое возрастание эффективной вязкости (в 2–3 раза) при уменьшении расхода: вблизи Второго конуса Северного прорыва Толбачика она составляла в среднем 2×10^6 Пз²⁵. При дальнейшем увеличении вязкости на поверхности лавовых потоков могут образовываться такие структуры течения, как складки сжатия, валы коробления, хребты сдавливания, трещины растяжения. Большое разнообразие поверхностей лавовых потоков наблюдалось на вулкане Кудрявый (о. Итуруп).

В лавах средней вязкости на поверхности образуются кучи шлаковых, округлых обломков, которые называют обломочной (шлаково-глыбовой) лавой, иногда даже глыбовой (рис. 4г)²⁶. Крупноглыбовая отдельность потока наблюдалась на вулкане Безымянный. Наиболее крупные глыбы (до 10–15 м в поперечнике) приурочены к краевым частям потока, образуют бортовые валы андезитового потока, на несколько метров возвышающиеся над основной поверхностью, сложенной более мелкими обломками [14].

Нередко вдоль бортов потоков на поверхности прослеживается серия продольных волнообразных складок сжатия высотой до 0,5 м, сложенных полосами несортированных угловатых обломков с занозистой и шероховатой поверхностью. Образование таких складок связано с пульсационной подачей лавового материала из кратера. Хребты сдавливания обычно тянутся вдоль потоков на 25–30 м, каждый из них имеет ширину 5–8 м и возвышается над поверхностью потока на 7–12 м. Эти образования были более пологи в направлении движения потоков и возникали при сильном боковом давлении на движущийся поток вязкой лавы.

Если лавовые потоки, покрытые очень толстой шлаковой коркой, текут по уступам местности, то корка разламывается, в образовавшиеся поперечные трещины проникает еще текущая лава внутренней части потока и застывает в них в виде жилообразных лавовых клиньев. Большие валы коробления образуются в заключительную стадию застывания потоков благодаря

21 Петрусь А. Филиал Мордора. Лавовые поля Толбачика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mirputeshestvij.mediasole.ru/filial_mordora_lavovye_polya_tolbachika (дата обращения: 15.08.2024).

22 Гавайские вулканы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://masterok.livejournal.com/105805.html> (дата обращения: 15.08.2024).

23 Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Вулкан Толбачик: гавайские извержения на Камчатке // Природа. 2013. Т. 10. № 1178. С. 59–67.

24 Андреев В.Н., Гусев Н.А., Ковалев Г.Н. и др. Динамика лавовых потоков Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 18–26.

25 Ванде-Кирков Ю.В. Вязкость лав Северного прорыва (вулкан Толбачик, 1975 г.) // Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 13–17.

26 Геологический словарь: в 2 т. / Х.А. Арсланов, М.Н. Голубчина, А.Д. Искандерова и др.; гл. ред. акад. К.Н. Паффенгольц (отв. ред.). М.: Недра, 1978. Т. 1. 486 с.

гидростатическому напору раскаленной лавы, текущей под затвердевшей поверхностной коркой. Именно поэтому к этим валам повсеместно были приурочены многочисленные фумаролы. Валу протягиваются на 20–150 м через всю ширину потока, располагаясь перпендикулярно к направлению его движения. Они представляли собой хаотические нагромождения глыб лавы с натечными шероховатыми поверхностями.

В тех случаях, когда корка толстая и лава уже вязкая, образуется плоскоглыбовый купол или же вытянутый плоскоглыбовый хребет. Внутри лавового потока вследствие неравномерного воздымания и частичного проседания отдельных участков кровли потока при условии меняющегося напора лавы, поступающей по трубам, может возникать сложная система ходов. Напор имеет чисто гидростатическую природу. Лавовые трубы и лавовые пещеры являются одной из главных особенностей лавовых потоков и покровов Толбачинского дола.

Особенности поверхностей лавовых потоков хорошо дешифрируются на аэро- и космических снимках. Поверхность лавовых потоков вулкана Мауна-Лоа на большем его протяжении отображается ровным серым тоном (табл. 1, строка 1). Значительных изменений в изображении поверхности гладких волнистых лав гавайских вулканов и подобных им потоков на вулканах Толбачик, Кудрявый и др. не наблюдалось. Изображение участков гладкой волнистой поверхности потоков имеет ровный светло-серый фототон, обусловленный отсутствием теней.

Шлаково-мелкоглыбовая лава хорошо дешифрируется на снимках (табл. 1, строка 2). Характерны зернистый рисунок изображения и более светлый фототон по сравнению с канатными лавами, что обусловлено меньшим количеством теней. Хорошо различимы поперечные трещины в лавовом потоке.

На снимках изображение поверхности лавовых потоков с плоскоглыбовой отдельностью можно охарактеризовать следующим образом (табл. 1, строка 3): пятна имеют различный фототон — от светло-серого до темно-серого. Плиты выделяются на общем фоне за счет наличия теней по периметру, преимущественно собственных.

Для изображений канатных лав характерно чередование освещенных и затененных поверхностей волн лавы. Фототон от серого до темно-серого. Наблюдаются сегменты темных затененных полос в понижениях волн поверхности. В понижениях скапливаются тефра и золотый материал и со временем наблюдается заселение растительностью.

Поверхность крупноглыбовой лавы состоит из крупных обломков, на которые распался лавовый поток. Наблюдается большое количество глубоких продольных и поперечных трещин. Хорошо различаются крупные глыбы, которые выделяются по наличию теней — как падающих, так и собственных. Четко прослеживаются бортовые валы потока и проработанное русло, по которому прошла вторая порция излияния. На местах перегибов склонов, по которым стекают лавовые потоки, распознаются поперечные трещины, пересекающие лавовый поток. Иногда при разрывах «кожи» в местах прохождения выпуклых перегибов образуются выжимки.

Восстановление полной картины возможно при тщательном дешифрировании аэрофотоснимков. Хорошо видны различия поверхностей лавовых потоков, запечатленные в разнообразии структуры их изображения, которая появляется вследствие неравномерной освещенности разно ориентированных поверхностей глыб.


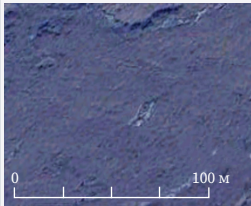
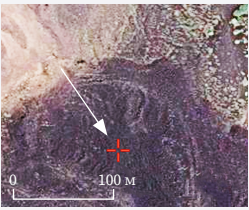
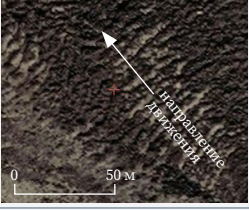

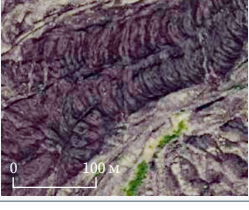
Таблица 1 
Дешифровочные признаки проявлений процесса эффузивного вулканизма

Table 1
Decoding signs of trappings of the effusive volcanism process

Тип потока лавовых излияний		Характер поверхности	Дешифровочные признаки	Общий вид на снимках
1	Гладкая лава («лава-шоссе»)	Ровная поверхность с редкими разрывами (в основном поперек направления движения потока). Иногда наблюдаются небольшие повышения и понижения рельефа поверхности	Рисунок поверхности однотонный, ровный. Фототон изображения поверхности лавового потока варьирует от серого до черного	

Тип потока лавовых излияний		Характер поверхности	Дешифровочные признаки	Общий вид на снимках
2	Шлаково-мелкоглыбовая или обломочная ('а'а) лава	Поверхность покрыта шлаковыми округлыми обломками различной величины. Наблюдается большое количество бугров и трещин	Характерен зернистый рисунок поверхности и более светлый фототон, чем у канатных лав, за счет меньшего количества теней. Хорошо дешифрируются поперечные трещины в лавовом потоке	
3	Плоскоглыбовая (или пластинчатая) лава	Относительно ровная поверхность, разделенная на хаотично расположенные плоские плиты с грубой, часто рубчатой поверхностью, иногда с нагромождением плит в местах заторов, образующихся при течении потока	Фототон от светло-серого до темно-серого. Плиты выделяются на ровной поверхности наличием теней по периметру, преимущественно собственных	
4	Канатная лава	Корка, смятая при сдавливании в направлении течения потока. Наблюдается чередование освещенных и затененных поверхностей волн	Фототон от серого до темно-серого. Наблюдаются сегменты темных затененных полос в понижениях волн поверхности. В понижениях скапливаются тефра и эоловый материал и появляется пионерная растительность	
5	Крупноглыбовая лава	Поверхность покрыта крупными обломками. Поток распадается на крупные глыбы. Наблюдается большое количество глубоких продольных и поперечных трещин	Хорошо различаются крупные глыбы, выделяются наличием теней — как падающих, так и собственных	
6	Хребты сдавливания	Вдоль бортов потоков прослеживается серия продольных волнообразных складок сжатия, обычно они тянутся на 25–30 м, каждая из них имеет ширину 5–8 м и возвышается над поверхностью потока на 7–12 м. Сложены угловатыми обломками	Протяженные возвышенные краевые структуры, параллельные потоку	
7	Валы коробления	Представляют хаотические нагромождения глыб лавы с натечными шероховатыми поверхностями. Протягиваются на 20–150 м через всю ширину потока, располагаясь перпендикулярно к направлению его движения	Натечные образования, перпендикулярные движению потока. Выделяются многочисленные поперечные валы и трещины	

4 Выводы

Применение аэрокосмических снимков позволило проанализировать изменения в состоянии поверхностей лавовых потоков в зависимости от химического состава и вязкости. В результате дешифрирования проявлений вулканической деятельности эффузивного типа создан классификатор дешифровочных признаков этих проявлений и выработаны критерии их формализации для автоматизированного дешифрирования. Выявление проявлений деятельности, характерной для того или иного вулкана, позволяет определить принадлежность его очагов к типу М (мантийному) или К (коровому), тектоническое положение постройки и геодинамический режим, которыми определяется опасность эффузивных и эксплозивных извержений. Результаты позволили

определить основные дешифровочные признаки этих проявлений и выявить критерии их формализации для дальнейшей автоматизации процесса их распознавания, определения уровня вулканоопасности и планирования землепользования. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов.

Вопрос об автономности каждой категории природопользования слабо изучен и в настоящее время. Процессы переноса вещества и энергии «не признают» любые административно-территориальные и кадастровые деления, нарушая этим принципы кадастровой оценки и кадастровой регистрации участков по социально-экономическим интересам. Возникает необходимость приоритета в использовании экологических знаний об изучаемом вулканическом природном комплексе и его взаимодействии со смежными географическими оболочками [15–17].

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательского проекта (Постановление ПСО № 486 от 27 октября 2022 г.).

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Мелкий В.А. Разработка теории аэрокосмического мониторинга вулканоопасных территорий // Геодезия и картография. 2000. № 11. С. 52–53.
2. Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А. и др. Извержения вулканов северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 3–19. DOI:10.31857/S0203030620010058.
3. Аврунев Е.И., Ямбаев Х.К., Оприцова О.А. и др. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 3. С. 211–228.
4. Хлебникова Т.А., Ямбаев Х.К., Оприцова О.А. Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем для моделирования геопространства // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 1. С. 106–118. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118.
5. Shahtahmassebi A.R., Li C., Fan Y., et al. Remote sensing of urban green spaces: A review // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 57. 126946. DOI:10.1016/j.ufug.2020.126946.
6. Верхотуров А.А. Мониторинг состояния природной среды территорий активного вулканизма // Сборник материалов XVIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 4. С. 152–156. DOI:10.33764/2618-981X-2022-4-152-156.
7. Беленко В.В. Концепция и технология мониторинга земель застраиваемых территорий по материалам космической съемки: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 209 с.
8. Долгополов Д.В. Теоретическое обоснование комплекса технологий аэрокосмических исследований для обеспечения строительства и эксплуатации магистральных нефтепроводов Российской Федерации: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2024. 233 с.
9. Дубровский А.В. Методологическое и теоретическое обоснование принципов эффективного использования земельных ресурсов на основе геоинформационных технологий: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2024. 255 с.
10. Комиссаров А.В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2016. 278 с.
11. Newhall C.G., Self S., Robock A. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts // Geosphere. 2018. Vol. 14. No. 2. P. 572–603. DOI:10.1130/GES01513.1.
12. Сывороткин В.Л. Извержения вулканов // Пространство и время. 2017. Т. 1. № 27. С. 196–213.
13. Belousov A., Belousova M. Dynamics and viscosity of ‘a’a and pahoehoe lava flows of the 2012–2013 eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka (Russia) // Bulletin Volcanology. 2018. Vol. 80. No. 6. P. 1–23. DOI:10.1007/s00445-017-1180-2.

14. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
15. Братков В.В., Керимов И.А., Волчкова В.В. и др. Картографирование климатогенной динамики ландшафтов Северо-Западного Прикаспия на основе данных дистанционного зондирования Земли // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47. № 3. С. 331–342. DOI:10.52575/2712-7443-2023-47-3-331-342.
16. Серее Т.Э., Братков В.В. Изменения в использовании земель в 2012–2022 годах и их влияние на температуру поверхности Земли по космическим снимкам (на примере г. Мендеферы, государство Эритрея) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68. № 3. С. 26–41. DOI:10.30533/GiA-2024-020.
17. Креймер М.А., Трубина Л.К. Некоторые аспекты интеграции кадастра и геоэкологии в управлении землепользованием // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2009. № 5. С. 26–29.

АВТОРЫ **Мелкий Вячеслав Анатольевич**

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
лаборатория вулканологии и вулканопасности

д-р техн. наук

 0000-0001-8919-8508

Верхотуров Алексей Александрович

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
лаборатория островных и прибрежных электроэнергетических систем

канд. техн. наук

 0000-0002-3826-7339

Поступила 10.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Identification of decoding signs of effusive volcanic activity manifestations for identifying its impact on the territory

Vyacheslav A. Melkiy¹✉, Alexey A. Verkhoturov¹

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
✉ vamelkiy@mail.ru

CITATION Melkiy VA, Verkhoturov AA. Identification of decoding signs of effusive volcanic activity manifestations for identifying its impact on the territory. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 93–107. DOI:10.30533/GiA-2025-016.

KEYWORDS cadastral assessment, effusive volcanism, remote sensing, decoding of satellite images, risk, geoinformation mapping

ABSTRACT The purpose of the work is to identify decoding signs of manifestations of effusive activity of volcanoes characteristic of lava flows of basalt and andesite–basalt composition. The article presents data on the study of the spread of volcanogenic deposits in the territory adjacent to the eruptive center, Effusive activity is characteristic of volcanoes whose magmatic melt has a basalt or andesite-basalt composition. The type of effusive eruptions depends on the gas saturation of the magma: a more viscous melt saturated with silica oxide explodes more strongly. The relatively calm outflow of liquid basalt magma over the edge of the crater is typical of the Hawaiian and fissure types of eruptions. With an increase in the silicic acid content of magma, explosive dispersion occurs with greater force, cones form on the surface of the flows. Eruptions of andesite-basalt magma can most often be attributed to the Strombolian type, in which the volcano periodically emits bombs, lapilli and ash of sandy and smaller dimensions. Field research materials, low- and medium-resolution satellite images obtained from satellites Landsat, Canopus, Sentinel, and data from the Digital aerial photography were used for the work. The use of satellite images made it possible to accurately analyze changes in the state of the surfaces of lava flows of various compositions. As a result of decoding the manifestations of volcanic activity of the effusive type, a classifier of decoding signs of these manifestations was created and criteria for their formalization for automated decoding were developed. The identification of manifestations of activity characteristic of a particular volcano makes it possible to determine whether its foci belong to the M (mantle) or κ (crust) type, the tectonic position of the structure and the geodynamic regime, which determine the danger

of effusive and explosive eruptions. More detailed studies require the use of unmanned aerial vehicles. The results of decoding aerospace images reflecting the manifestations of the effusive activity of volcanoes made it possible to identify the main decoding signs of these manifestations and identify criteria for their formalization for further automation of the process of their recognition, determination of the level of volcanic hazard and land use planning.

ACKNOWLEDGEMENTS


The research was carried out with the support of a grant from the Government of the Sakhalin Region in the form of a grant to young scientists for the implementation of a research project (PSO Resolution No. 486 dated 10/27/2022), issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region.

REFERENCES


1. Melkiy VA. Razrabotka teorii aerokosmicheskogo monitoringa vulkanoопасnykh territoriy [Development theory of aerospace monitoring of volcanic hazard areas]. *Geodesy and Cartography*. 2000;11: 52–53. (In Russian).
2. Ozerov AYu, Girina OA, Zharinov NA, et al. Izverzheniya vulkanov severnoj gruppy Kamchatki v nachale XXI veka [Volcanic eruptions of the northern group of Kamchatka at the beginning of the XXI century]. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020;1: 3–19. (In Russian). DOI:10.31857/S0203030620010058.
3. Avrunev EI, Yambaev HK, Opritova OA, et al. Ocenka tochnosti 3D-modelej, postroennykh s ispol'zovaniem bespilotnykh aviacionnykh sistem [Accuracy evaluation of 3D models by using unmanned aerial systems]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(3): 211–228. (In Russian).
4. Khlebnikova TA, Yambaev HK, Opritova OA. Razrabotka tehnologicheskoy shemy sbora i obrabotki dannykh ajerofotos'emki s ispol'zovaniem bespilotnykh aviacionnykh sistem dlja modelirovaniya geoprostranstva [Development of a technological scheme for collecting and processing aerial photography data using unmanned aircraft systems for geospatial modeling]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(1): 106–118. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118.
5. Shahtahmassebi AR, Li C, Fan Y, et al. Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021;57: 126946. DOI:10.1016/j.ufug.2020.126946.
6. Verhoturov AA. Monitoring sostojaniya prirodnoj sredy territorij aktivnogo vulkanizma [Monitoring State of Natural environment of Territories with active volcanism]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVIII International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 4. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 152–156. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-4-152-156.
7. Belenko VV. *Koncepcija i tehnologija monitoringa zemel' zastraivaemykh territorij po materialam kosmicheskoy s'emki* [The concept and technology of monitoring the lands of built-up territories based on space survey materials] [dissertation]. Moscow; 2019. 209 p. (In Russian).
8. Dolgopolov DV. *Teoreticheskoe obosnovanie kompleksa tehnologij ajerokosmicheskikh issledovanij dlja obespechenija stroitel'stva i jekspluatacii magistral'nykh nefteprovodov Rossijskoj Federacii* [Theoretical substantiation of a complex of aerospace research technologies for the construction and operation of main oil pipelines of the Russian Federation] [dissertation]. Novosibirsk; 2024. 233 p.
9. Dubrovsky AV. *Metodologicheskoe i teoreticheskoe obosnovanie principov jeffektivnogo ispol'zovanija zemel'nykh resursov na osnove geoinformacionnykh tehnologij* [Methodological and theoretical substantiation of the principles of effective use of land resources based on geoinformation technologies] [dissertation]. Novosibirsk; 2024. 255 p.
10. Komissarov AV. *Teorija i tehnologija lazernogo skanirovaniya dlja prostranstvennogo modelirovaniya territorij* [Theory and Technology of Laser Scanning for Spatial Modeling of Territories] [dissertation]. Novosibirsk; 2016. 278 p.
11. Newhall CG, Self S, Robock A. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. *Geosphere*. 2018;14(2): 572–603. DOI:10.1130/GES01513.1.
12. Syvrotkin VL. Izverzheniya vulkanov [Volcanic eruptions]. *Space and Time*. 2017;1(27): 196–213 (In Russian).

13. Belousov A, Belousova M. Dynamics and viscosity of 'a'a and pahoehoe lava flows of the 2012–2013 eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka (Russia). *Bulletin Volcanology*. 2018;80(6): 1–23. DOI:10.1007/s00445-017-1180-2.
14. Malyshev AI. *Zhizn' vulkana* [Life of Volcano]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2000. 260 p. (In Russian).
15. Bratkov VV, Kerimov IA, Volchkova VV, et al. Kartografirovanie klimatogennoj dinamiki landshaftov severo-zapadnogo Prikaspija na osnove dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli [Mapping the climatogenic dynamics of landscapes in the north-western Caspian region based on Remote sensing data]. *Regional Geosystems*. 2023;47(3): 331–342. (In Russian). DOI:10.52575/2712-7443-2023-47-3-331-342.
16. Sereke TE, Bratkov VV. Izmenenija v ispol'zovanii zemel' v 2012–2022 godah i ih vlijanie na temperaturu poverhnosti Zemli po kosmicheskim snimkam (na primere g. Mendefery, gosudarstvo Yeritreja) [Land use / Land cover Changes and their effects on land surface temperature using space images (by the example of Mendefera, Eritrea, 2012–2022)]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(3): 26–41. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-020.
17. Kreymer MA, Trubina LK. Nekotorye aspekty integratsii kadastra i geojekologii v upravlenii zemlepol'zovaniem [Some aspects of the integration of cadastre and geocology in land use management]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2009;53(5): 26–29. (In Russian).

AUTHORS Vyacheslav A. Melkiy

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
 Laboratory of Volcanology and Volcano Hazard
 Dr. of Sci. (Engineering)
 0000-0001-8919-8508

Alexey A. Verkhoturov

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

Submitted: November 10, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Анализ лучших мировых практик развития 3D-кадастра с использованием цифровых информационных моделей и их имплементации в России

А.М. Тарарин¹, А.С. Сейтвелиева¹ 

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
 ainaocenka@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Тарарин А.М., Сейтвелиева А.С. Анализ лучших мировых практик развития 3D-кадастра с использованием цифровых информационных моделей и их имплементации в России // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 108–123. DOI:10.30533/GiA-2025-017.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА 3D-кадастр, информационные модели объектов капитального строительства, международные отраслевые классы IFC, CityGML, IndoorGML и LandInfra/InfraGML

АННОТАЦИЯ В статье рассматриваются технические аспекты формирования трехмерного кадастра путем интеграции информационных моделей объектов капитального строительства (ИМ ОКС). Освещается положительный зарубежный опыт формирования 3D-кадастра с использованием цифровых информационных моделей объектов недвижимости. Приведены особенности ведения отечественного кадастра недвижимости в целях имплементации цифровых информационных моделей объектов недвижимости в российских условиях. Проанализированы основные международные стратегические документы в области кадастра недвижимости. Отмечено значение данных из ИМ ОКС, описаны их основные характеристики. Проанализировано содержание международных открытых стандартов, используемых для управления и обмена геопространственными данными. Уровень развития отечественного программного обеспечения в области технологий информационного моделирования объектов капитального строительства замедляет процессы интеграции информационных моделей в кадастровые информационные системы. Для кадастровой 3D-визуализации рассмотрены способы интеграции в целях создания кадастровых 3D-моделей: прямой или косвенный. При втором подходе сценарий развития отечественного кадастра показан через связывание кадастровой информации как правовой модели с физической моделью с подробным описанием элементов здания для определения трехмерных кадастровых границ, точным созданием трехмерных кадастровых моделей. При утверждении требований к содержанию

ИМ ОКС необходимо рассмотреть возможные пути межведомственного взаимодействия государственных органов в области градостроительства. На этапе утверждения требований к ИМ ОКС рассматривается интероперабельность в свете развития кадастровых систем, поскольку регистрация прав на недвижимость и постановка на кадастровый учет объекта недвижимости являются ключевыми составляющими управления недвижимостью.

1 Введение

Главными целями кадастра со времен его зарождения в Древнем мире были учет и налогообложение земельных участков. Основными показателями для этого в кадастре являются площадь земельных участков и описание их границ на плане. Постепенно в кадастре появлялась информация о строениях, расположенных на земельных участках, затем и о подземных сооружениях, но их описание традиционно проводилось в двухмерном виде. Два тысячелетия кадастр развивался в основном за счет совершенствования приборов и технологий, используемых в кадастровых съемках для получения плоских координат. И лишь в прошлом веке в мире произошли коренные изменения, послужившие предпосылками к созданию трехмерного кадастра недвижимости. С одной стороны, в связи с активной урбанизацией и развитием строительных технологий города начали расти не только вширь, но и ввысь, а также активно стало осваиваться подземное пространство. С другой стороны, век компьютеризации принес новые геоинформационные технологии, которые позволили создавать кадастровые информационные системы и трехмерные модели объектов. Таким образом, с одной стороны, возникли проблемы учета разных объектов недвижимости, расположенных в одной вертикальной плоскости на земле, над землей и под землей, и регистрации прав на них, с другой — появились технологии трехмерного моделирования, которые позволяют наилучшим образом описывать объекты окружающего мира и их взаимное расположение.

Многоуровневая застройка по вертикали вызывает массу споров практически во всем мире. Прежде всего, это связано с ведением достоверного кадастрового учета таких объектов капитального строительства, их корректным отображением в кадастровых информационных системах. В качестве одного из решений данной проблемы рабочей группой 3D Cadastres в составе Международной федерации геодезистов (*фр.* Fédération Internationale des Géomètres, FIG, 1998) была предложена концепция создания 3D-кадастра. Во всем мире было предпринято несколько попыток реализации 3D-кадастров, включая широкий спектр потенциальных решений и важных открытий, касающихся таких областей, как тип данных, моделирование данных, системная архитектура и визуализация [1–3]. В России в свете перехода на технологии информационного моделирования объектов капитального строительства очевидна и перспектива использования цифровых моделей в качестве основы формирования 3D-кадастра.

В условиях цифровой трансформации происходят глобальные изменения строительства и взаимосвязанных с ним отраслей экономики. Разработка эффективных методов и высокотехнологичных решений в строительстве для перехода в цифровую среду является одним из инструментов достижения стратегических целей и национальных задач, определенных указом президента Российской Федерации¹. В рамках Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период

¹ Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1305894187> (дата обращения: 12.08.2024).

до 2030 года с прогнозом до 2035 года² (далее — стратегия) определены пути совершенствования современных цифровых технологий при проектировании и строительстве. Одной из ключевых целей стратегии является создание и полноценное функционирование цифрового строительства, которое, в свою очередь, напрямую связано с геопространственной индустрией. В стратегии отмечена важная роль развития федеральной государственной информационной системы ведения Единого государственного реестра недвижимости (ФГИС ЕГРН) для строительного цикла через процедуры государственной регистрации прав на недвижимость и государственный кадастровый учет объекта капитального строительства. Проблема обусловлена необходимостью реализации ряда перечисленных положений нормативно-правовых актов в отношении обновления кадастра недвижимости.

К 2030 году прогнозируется вовлечение в оборот в целях жилищного строительства земельных участков общей площадью 210 тыс. гектаров. Для этого сфера строительства и сфера управления недвижимым имуществом должны взаимодействовать в едином цифровом пространстве.

Уровень наполненности цифровой среды строительства связан с внедрением технологий информационного моделирования. Информационные системы для органов государственной регистрации, кадастра и картографии имеют тенденцию развития в ключе формирования и ведения информационных моделей объектов капитального строительства (ИМ ОКС) благодаря реализации государственных программ.

В 2019 году на законодательном уровне закреплено понятие ИМ ОКС³. Весьма важно разграничить понятия «информационная модель объекта капитального строительства» и «цифровая информационная модель объекта капитального строительства» в контексте их применения в кадастре недвижимости. Цифровая информационная модель (трехмерная модель) входит в состав ИМ ОКС⁴. Последняя представляет собой объем данных, объединяющих физическую и функциональную информацию об объекте, в том числе в ней содержится цифровая информационная модель. Под информационным моделированием в строительстве следует понимать процесс, при котором на каждом этапе жизненного цикла объекта капитального строительства создается и поддерживается информационная модель, способная предоставлять уточненные сведения об этом объекте на определенный период времени.

Обзор зарубежного опыта кадастрового учета объектов недвижимости в трехмерном виде позволит изучить порядок формирования информационных моделей и возможности их интеграции в кадастровые информационные системы. История возникновения технологии информационного моделирования зданий (*англ.* Building Information Model, BIM) начинается с введения понятия «система описания здания» (*англ.* Building Description Systems) в 1974 году в журнале Американского института архитекторов⁵. Реконструкция аэропорта в Хитроу⁶ производилась на основе проектной документации с использованием технологий информационного моделирования. По итогу такого проектирования

2 Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 г. № 3268-р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/352185341?ysclid=m50usyr3ba104184082> (дата обращения: 12.08.2024).

3 Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (ред. от 1 февраля 2024 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040 (дата обращения 12.02.2024).

4 СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573514520?ysclid=lakpwwqpyl12018652> (дата обращения: 07.11.2023).

5 Eastman Ch., Fisher D., Lafue G., et al. An Outline of the Building Description System: Research Report No. 50 / Institute of Physical Planning. Pittsburgh: CMU, 1974. 23 p.

6 Eastman Ch., Teicholz P., Sacks R., et al. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Hoboken: Wiley, 2018. 688 p.

и строительства была создана база данных о зданиях и строениях. Так появилось первое программное обеспечение для описания отдельных библиотечных элементов. В обновленных версиях вносились изменения, добавлялись функции, вводились новые библиотеки.

Современные технологии информационного моделирования строятся на поиске решений, направленных на формирование достоверных моделей с возможностью обмена между физической и виртуальной (цифровой) средами. При использовании дополнительных форм отображения информации об объекте повышается точность в расчетах объемов работ, что позволяет достоверно определять такие значимые для здания характеристики, как площадь, полезная площадь, строительный объем, этажность (в случае, когда секции здания имеют разную этажность).

Вопросы развития территорий в информационном поле связаны с точностью описания объектов градостроительной деятельности и унификацией используемых систем координат [4], которые приводят к представлению объекта в цифровом объектно-пространственном виде. Цифровой объектно-пространственный вид объекта капитального строительства с привязкой к местности позволяет детально рассматривать элементы многоуровневой застройки (тогда рассмотрения земельного участка в горизонтальной проекции недостаточно, возникает необходимость указания высоты / глубины и их графического отображения). Определение контура здания, его легализованных пределов является еще одной проблемой при постановке на кадастровый учет такого объекта недвижимости [5]. Элементами многоуровневой застройки могут быть здания и сооружения с нависающими конструкциями, надстройками на эксплуатируемой кровле, их двумерная проекция не способна показать все конструктивные и архитектурные решения. При постановке на кадастровый учет подобных зданий возникают определенные трудности в их корректном отражении в техническом плане⁷, расчет площади здания может быть выполнен с грубой погрешностью⁸. В таком случае целесообразно использовать данные из ИМ ОКС, в том числе цифровую модель (3D-модель). В решении таких задач отечественные авторы рассматривают переход от двумерного (2D) к трехмерному (3D) кадастру недвижимости [6–8]. В 2010 году в России были предприняты попытки создания и внедрения модели трехмерного кадастра недвижимости⁹, однако на тот период информационное моделирование в строительстве не было закреплено законодательством, эта идея осталась в рамках пилотного проекта.

В прошлом десятилетии в основу зарубежного кадастра в трехмерном виде были заложены 3D-модели объектов недвижимости по категориям пространственных единиц [9]. В вопросах интеграции информационных моделей в кадастровые информационные системы следует обратить внимание на зарубежный опыт. Так, создание функциональной кадастровой системы 3D с использованием информационных моделей зданий рассматривается в ряде работ иностранных авторов [10–13].

7 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 15 марта 2022 г. № П/0082 «Об установлении формы технического плана, требований к его подготовке и состава содержащихся в нем сведений». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403720102/> (дата обращения: 07.11.2023).

8 Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 23 октября 2020 г. № П/0393 «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машино-места». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74812016/> (дата обращения: 07.11.2023).

9 Российско-нидерландский проект «Создание модели трехмерного кадастра объектов недвижимости в России» // Вестник Росреестра. 2012. Т. 3. № 13. С. 74–76.

2 Материалы и методы

Динамическое освоение территорий влечет за собой пользование общими природными ресурсами, а организация их рационального использования является первоочередной задачей [14]. Контроль застройки территорий должен осуществляться с применением эффективных технологий. Своевременная постановка на кадастровый учет объектов недвижимости с указанием достоверной информации о них может быть достигнута на основе цифровых моделей объектов капитального строительства.

В настоящее время в России практически отсутствует исчерпывающая информация в отношении использования информационных моделей зданий в смежных областях, поскольку требования к ее содержанию и наполненности находятся на стадии урегулирования на законодательном уровне. В мировой практике применяются методы междисциплинарной интеграции информационных моделей зданий, изучаются 3D-модели зданий в организационном и социальном направлениях с целью удовлетворения требованиям устойчивого развития городских территорий. Качество данных информационных моделей зданий, возможность управления жизненным циклом зданий и формирование достоверной кадастровой экосистемы рассматриваются в ряде стран как единая система.

Переходя к анализу зарубежного опыта использования трехмерных моделей объектов недвижимости, рассмотрим понятие «кадастр», который был определен в Международной федерации геодезистов^{10,11}. В этом контексте кадастры отражают интересы людей в отношении земельного участка, его части, например информацию о владельце земельного участка, геометрические данные (координаты и карты), назначение земель.

В продолжение своих исследований FIG в 2015 году предложила концепцию 3D-кадастров Cadastre 2034 с привязкой ко времени [15]. В табл. 1 выделены пути развития кадастровых информационных систем в соответствии с намеченными планами международных инициатив.


Таблица 1 
Международные стратегии
в области кадастра
недвижимости

Table 1
International strategies in the field
of real estate cadastre

Предпосылки развития кадастровых систем	Международные инициативы	
	Кадастр 2014	Кадастр 2034
Определение кадастровых границ	Двухмерная кадастровая карта	Трехмерная кадастровая карта
Внедрение новых технологий	Цифровой формат вместо бумажного носителя	Трехмерное моделирование, доступ к данным в режиме реального времени
Развитие геоинформационных систем (ГИС)	Появление и внедрение ГИС	Наполнение кадастровых систем дополнительными сведениями
Появление технических моделей (формат)	PDF	CityGML, IndoorGML, BIM/IFC, LandXML
ИМ ОКС	Обсуждение на конференциях	Принятие стандартов
Междисциплинарное взаимодействие	Экономика	Экономика, строительство, информационная безопасность

Периодически представители FIG проводят опрос стран-участниц, связанный с развитием 3D-кадастра. Вопросы затрагивают актуальные темы исследований: регистрацию инфраструктурных сетей в земельном управлении,

10 FIG Statement on the Cadastre. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fig.net/resources/publications/figpub/pub11/FIG%20Statement%20on%20the%20Cadastre.pdf> (дата обращения: 07.11.2023).

11 Kaufmann J. Cadastre 2014: a vision for Future Cadastral Systems. Representative of FIG, Chair Working Group 7.1 FIG. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fig.net/resources/publications/figpub/cadastre2014/presentation/2002-05-kaufmann-granada-cad2014-paper.pdf> (дата обращения: 07.11.2023).

географические координаты, третье измерение в визуализации и регистрации, структуру и функциональные возможности кадастровой базы данных, связь между трехмерными моделями объектов капитального строительства и геоинформационных систем. По предварительным данным, в Швеции продолжается работа по изучению интеграции ИМ ОКС в геоинформационные системы в трехмерном виде, разрабатываются стандарты в данной области. В Нидерландах на законодательном уровне обсуждается статус введения подобной системы, как и в Швеции, разрабатываются технические возможности ее реализации [16]. В указанных странах предусмотрена возможность постановки на кадастровый учет подземных объектов инженерной инфраструктуры и коммуникаций [14].

Для кадастрового учета объектов недвижимости возможно использование достоверных данных из ИМ ОКС, поскольку это позволит снизить риск реестровых ошибок, потерь данных при уточнении сведений о данном объекте и окружающей его инфраструктуре. Для дальнейшего изучения вопроса интеграции ИМ ОКС в кадастровую информационную систему важно рассмотреть ее основные характеристики (табл. 2). Многокомпонентное содержание информационной модели объекта капитального строительства позволяет рассматривать ее в качестве источника для внесения в кадастровую информационную систему.

Таблица 2 ➔

Основные характеристики информационных моделей

Table 2

Main characteristics of information models

Характеристики информационной модели	Описание признаков
Информационная наполненность	Объект недвижимости описывается с учетом наиболее значимых сведений о проектировании, его возведении (реконструкции), эксплуатации, ликвидации (сносе)
Определенность и дискретность содержания	Указываются основные показатели объекта (технико-экономические, физические, функциональные), сложившиеся в определенный период времени
Доступ и хранение информации	Доступ к ИМ ОКС предоставляется без возможности внесения изменений посторонними лицами, т. е. ограниченному кругу лиц, электронный документооборот позволяет идентифицировать лица
Способность трансформации	Вносятся изменения через обновление ИМ ОКС как при проектировании, так и при строительстве и вводе в эксплуатацию. Проектная модель (PIM) преобразуется в эксплуатационную модель (AIM)*
Сведения об интеллектуальной собственности	Могут быть указаны программы и приложения для ЭВМ, новые технологические решения, уникальные архитектурные решения, платформы для хранения базы данных, базы данных и т. д.

* Дифференциация цифровых моделей впервые приведена в британском стандарте PAS-1192-3:2013, далее осуществлена в проекте международного стандарта ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modeling (BIM) — Information management using building information modeling (Part 1: Concepts and principles).

Одним из первых примеров применения информационной модели здания в кадастре явилась регистрация железнодорожной станции в Делфте (Нидерланды) в 3D в 2016 году. В том же 2016 году комплекс жилых зданий в Амстердаме был показан в 3D-кадастре с использованием технологий информационного моделирования [17]. В 2014 году в Швеции при строительстве и вводе в эксплуатацию больницы в Стокгольме было изучено взаимодействие 1) информационной модели зданий (BIM), 2) регистрации и визуализации трехмерной информации о недвижимости [18].

Право собственности может возникнуть в результате раздела прав на недвижимое имущество, объединения, перераспределения и других процессов. 3D-недвижимость — это форма недвижимости, которая регистрируется с соответствующими правами, ограничениями и обязанностями (*англ.* Right, Restriction, and Responsibility, RRR) в национальной системе кадастрового учета [19]. В Швеции разработчик (предприниматель) часто предоставляет 3D-чертежи САД, содержащие трехмерные границы недвижимости на цифровой индексной карте и в кадастровых делах (записано в 2D). Однако эти рисунки официально не архивируются в национальном реестре недвижимости [20]. В Швеции кадастр

носит гибридный характер, как и в большинстве стран (объекты недвижимости регистрируются с помощью кадастровой 2D-карты и земельной книги).

Вопрос выбора уровня проработки цифровой модели для включения в кадастровые информационные системы, методов определения контуров объектов капитального строительства остается актуальным [21]. На основании вышеизложенного целесообразно рассмотреть технические аспекты формирования трехмерного кадастра. Так, международные открытые стандарты разработаны для эффективного управления и обмена геопространственными данными IFC, CityGML, IndoorGML и LandInfra/InfraGML¹². Описание данных стандартов приведено в табл. 3. Для зданий особое значение имеют геометрические и семантические характеристики, а уровень детализации (*англ.* Level of Detail, LOD) и уровень проработки (LODs) цифровых моделей позволяют уточнять и регулировать объем этих данных [22].


Таблица 3 
Описание форматов в информационном моделировании

Table 3
Description of formats in information modeling

Формат данных	Описание хранения	Функция, последняя версия
IFC (<i>англ.</i> Industry Foundation Classes — отраслевые базовые классы)	Открытый формат и схема данных, представляющие собой международный стандарт обмена данными в информационном моделировании в области гражданского строительства и эксплуатации зданий и сооружений	Класс IFC — категория объектов, объединенных общностью главных признаков согласно принятой классификации IFC. Версия IFC — номер версии спецификации IFC, используемой для обмена данными (например, IFC 2.3.0.0, IFC 4.0.2.1 и т. д.)
MVD (<i>англ.</i> Model View Definition — определение модельного вида)	Подмножество версии формата IFC, используемое для обмена данными в целях конкретного применения или рабочего процесса	IFC2x3 Coordination View 2.0, IFC4 Reference View применим для конкретного рабочего процесса
GML	Открытый формат файла для хранения 3D-моделей, структура описывается в стандарте XML, может интегрировать все формы географической информации, включая не только обычные векторные или дискретные объекты, но и покрытия и данные датчиков	Служит языком моделирования для географических систем. Набор примитивов: «Характеристика», «Геометрия», «Система координат», «Топология», «Время», «Динамическая функция», «Охват», «Единица измерения», «Направления», «Наблюдения», «Правила оформления карты»
CityGML	Открытая стандартизированная модель данных для описания и хранения 3D-моделей городов и ландшафтов с атрибутами для разных масштабов просмотра. Обеспечивает основу для интеграции, хранения трехмерных геопространственных данных и обмена ими	Стандарт концептуальной модели CityGML 3.0 описывает общую семантическую информационную модель для представления трехмерных городских объектов
3D Tiles	Открытая спецификация для потоковой передачи и рендеринга гетерогенных трехмерных наборов геопространственных данных	Передаёт массивный геопространственный 3D-контент, фотограмметрию, 3D-здания, BIM/CAD, создаваемые экземпляры объектов и облака точек
IndoorGML	Открытый формат, который определяет модель открытых данных и XML-схему для пространственной информации внутри помещений	Намеренно фокусируется на моделировании внутренних пространств для целей навигации. IndoorGML — это прикладная схема GML 3.2.1
LandInfra / InfraGML	Концептуальная модель земли и инфраструктуры охватывает объекты наземной и гражданской инженерной инфраструктуры. Первоначальный выпуск этого стандарта предназначен для поддержки всех перечисленных выше объектов, за исключением инфраструктуры	Предполагаемые предметные области включают объекты, проекты, трассы, автомобильные и железнодорожные пути, топографическую съемку, особенности местности, разделение земель и «влажную» инфраструктуру (ливневая канализация, системы водоотведения и распределения воды)
CityJSON	Формат обмена данными для цифровых 3D-моделей городов и ландшафтов. Кодирование CityJSON на основе JSON реализует подмножество модели данных OGC CityGML (версия 3.0) и включает механизм расширения, специфичный для JSON	Для чтения, обработки и создания наборов данных, нацелен на создание инструментов и API, поддерживающих его. Использование JSON вместо GML позволяет сжимать файлы в 6 раз, упростив структуру файлов
GeoJSON	Открытый формат, предназначенный для географических структур данных. Объектная нотация JavaScript (JSON) набирает популярность для кодирования данных в веб-приложениях. JSON состоит из наборов объектов, описываемых парами «имя — значение» (должны иметь привязку к координатам)	Описывает кодировку GeoJSON и JSON-LD метаданных наблюдения Земли (EO) для наборов данных (гранул). Кодировка GeoJSON определяется как сжатие в нормативном контексте предлагаемой кодировки JSON-LD с некоторыми расширениями

¹² OGC Standards. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ogc.org/standard> (дата обращения: 07.11.2023).

Перечисленные форматы данных в информационном моделировании связывают элементы геодезической съемки в кадастровых информационных системах (3D-кадастр, Smart Cities, Urban Digital Twins, BIM). Обновленная версия CityGML 3.0 может выступать основой для интеграции, хранения трехмерных геопространственных данных и обмена ими. Выбор уровня детализации CityGML 3.0 зависит от полноты данных в цифровой модели:

- LOD0 — высокообобщенная модель (просмотр с большого расстояния);
- LOD1 — блочная модель / объекты выдавливания (на большой высоте, но в масштабе города);
- LOD2 — реалистичная обобщенная модель (с районами и кварталами города);
- LOD3 — высокодетализированная модель (строение, здание, сооружение).

Как уже упоминалось, и BIM/IFC, и CityGML могут представлять и моделировать геометрические и семантические данные. Сопоставим характеристики стандартов в разрезе реализации кадастровых информационных систем.

В табл. 4 представлены краткое сравнение CityGML [23] и IFC [24–26], свойства данных. Основными критериями сравнения являются геометрия, семантика, система координат, а также перспектива использования трехмерных моделей в кадастре недвижимости.

Таблица 4  Сравнительные характеристики стандартов CityGML и IFC

Table 4
Comparative characteristics for CityGML and IFC standards

Характеристики	Стандарты	
	CityGML	IFC
Разработчик (опубликовано)	GML	Mainly STEP
Архитектура	Диаграмма классов UML	EXPRESS
Атрибуты элементов	gml:id	GUID
Представление	Поверхности	Объемы
Геометрия	Представление	Объемы, развертки
Семантика	Детализация, уровень детализации	Подробная информация, уровень разработки
Система координат	Геодезическая система координат	Декартова система координат
Программное обеспечение	Низкий уровень	Средний уровень
Приложения	3D city modelling	BIM и AEC/FM
3D-кадастр	CityGML-LADM conceptual model, 3D Index MAP	Кадастровая модель на основе BIM/IFC, интегрированная со сведениями о правах. Детализированные строительные элементы для определения границ собственности

В настоящее время интеграция BIM и 3D-ГИС для 3D-кадастра на уровне города возможна при создании единой кадастровой модели на основе BIM, модели в крупном масштабе.

3 Результаты и обсуждение

Анализ зарубежного опыта показывает, что полнота наборов данных в цифровых моделях объектов капитального строительства напрямую зависит от уровня детализации. Основой формирования трехмерного кадастра являются международные открытые стандарты. Для определения уровня развития 3D-кадастра среди стран — участниц Международной федерации геодезистов был проведен опрос о текущем состоянии кадастровых информационных систем

Страна	Количество 2D-недвижимости	Количество 3D-недвижимости	Источник данных для 3D	Платформа визуализации
Швеция	165 130	492	Параметрическое моделирование, BIM, аэрофотосъемка, лидар	Визуализация Unreal engine (версия 4.27) с несколькими наборами данных*
Финляндия	738 000	171 390	Наклонная фотограмметрия, аэрофотосъемка, лидар, облако точек; информационная модель города — 3D-модель CityGML (LOD1–LOD2)	Семантическая 3D-модель города: сетевая модель virtualcitySYSTEMS Cesium: веб-интерфейсы и VR
Нидерланды	9 000 000	2	Аэрофотоснимок LIDAR, BIM-модели и 3D-модели городов, BGT (базовая регистрация крупномасштабной топографии), BAG (базовые адреса регистрации и здания), BOR (базовое общественное пространство регистрации)	virtualcitySYSTEMS, ESRI, IMAGEM и UNITY
Швейцария	4 000 000	1 400 000	Инфраструктура пространственных данных, портал геоданных, BIM-модели и 3D-модели городов	Веб-приложение, геопортал Virtual Zurich

* Geodata / Lantmäteriet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata> (дата обращения: 07.11.2023).


Таблица 5 
Анализ состояния зарубежных кадастровых информационных систем

Table 5
Analysis of the state of foreign cadastral information systems

(на конец 2022 года) и перспективах их развития на 2026 год [16]. В табл. 5 приведен анализ состояния кадастровых информационных систем с точки зрения трехмерного моделирования.

Учитывая современные тенденции развития кадастровых информационных систем в европейских странах, а именно предложения по интеграции информационных моделей объектов капитального строительства в геоинформационные системы, мы приходим к выводу, что прежде всего должны быть изучены технические возможности их использования, определены исходные данные для формирования 3D-модели.

В ряде исследований отмечаются некоторые причины слабого формирования 3D-кадастра в России. В первую очередь при осуществлении кадастровой и градостроительной деятельности необходимо предусмотреть единую геодезическую основу [27], разработать единые требования для формирования 3D-моделей объектов недвижимости для постановки на кадастровый учет [28]. Стоит также отметить и существенные особенности России: большая площадь территории государства по сравнению с другими странами, объемы застройки территорий. В каждом субъекте Российской Федерации предусмотрена местная система координат.

Изучение вопроса применения цифровых информационных моделей в сфере регистрации недвижимости во всем мире является перспективным направлением. В крупных российских городах технологии информационного моделирования применяются как для строительства, так и в рамках реализации программы реновации, соответственно, формируются ИМ ОКС [29]. Они представляют собой пространственную репрезентацию, которую при переводе в открытый стандарт обмена IFC, в свою очередь, можно интегрировать в кадастровые информационные системы.

На сегодняшний день разрабатываются требования к содержанию ИМ ОКС. Уровень развития отечественного программного обеспечения в области технологий информационного моделирования объектов капитального строительства представлен как средний. Для возможности интеграции информационных моделей в государственные информационные системы требуется разработка программных продуктов с беспрепятственной работой с цифровыми информационными моделями при меньших затратах времени и труда [30].

На основании вышеизложенного следует отметить, что в России идет формирование системы упорядоченных стандартов для сферы информационного моделирования в строительстве, на данном этапе возможно использование цифровых информационных моделей в кадастре недвижимости. Рассмотренный

второй подход из зарубежного опыта интеграции цифровых информационных моделей подразумевает разработку единой кадастровой модели на основе BIM, что можно применить для отечественного кадастра недвижимости.

Для кадастровых информационных систем формирование и ведение ИМ ОКС в соответствии с уже установленными требованиями позволят отражать достоверную информацию в цифровом объектно-пространственном виде с более точной привязкой к местности.

4 Выводы

Как показывает опыт ведения трехмерного кадастра в странах Европы, многоуровневую застройку по вертикали представляется возможным отразить в кадастровых информационных системах с применением технологий информационного моделирования. Для постановки на кадастровый учет необходимо выделить наиболее значимые физические параметры объектов недвижимости на основе сформированных и соответствующих требованиям цифровых информационных моделей в электронной виде. Были также показаны технические характеристики информационных моделей для целей интеграции в кадастровые системы в разных странах.

Мировая практика свидетельствует о том, что в процессе интеграции информационной модели объектов недвижимости в ГИС возникает ряд технических проблем: несовместимость форматов, различные системы координат. Необходимо учитывать указанные особенности и для российского кадастра недвижимости с применением трехмерных моделей. Особое внимание важно уделить разработке отечественных программных продуктов в области информационного моделирования, они должны отвечать требованиям к обмену моделями в различных форматах.

Для кадастра недвижимости процесс цифровизации возведения зданий имеет неоспоримую ценность, поскольку современные технологии информационного моделирования строятся на поиске решений, направленных на формирование достоверных моделей с возможностью обмена между физической и виртуальной (цифровой) средами. При совершенствовании требований к содержанию ИМ ОКС, развитии информационных систем обеспечения градостроительной деятельности целесообразно наладить интероперабельность данных и реализовать меры для межсистемного информационного взаимодействия с федеральной государственной информационной системой ведения Единого государственного реестра недвижимости. Анализ лучших мировых практик развития 3D-кадастра показал перспективу развития кадастровых информационных систем с использованием информационных моделей и имеет высокую практическую значимость для внедрения в России.


БИБЛИОГРАФИЯ

1. Романов В.М., Троицкая В.О. Исследование мировой практики вопроса формирования и развития 3D кадастра в INTERNET пространстве с помощью порталных технологий и поисковых систем // Материалы 8-й Региональной научно-практической конференции «Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика». Нижний Новгород: ННГАСУ, 2020. С. 50–56.
2. Vandyшева N., Ivanov A., Pakhomov S., et al. Design of the 3D Cadastre Model and Development of the Prototype in the Russian Federation // Proceedings 2nd International Workshop on 3D Cadastres. Delft, 2011. P. 355–375.
3. Stoter J., van Oosterom P., Ploeger H. The phased 3D cadastre implementation in the Netherlands // Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Cadastres. Shenzhen, 2012. P. 201–218.
4. Тарарин А.М., Беляев В.Л. Пространственные данные в градостроительной деятельности // Геодезия и картография. 2020. № 11. С. 29–39. DOI:10.22389/0016-7126-2020-965-11-29-39.

5. Атаманов С.А., Григорьев С.А., Косаруков З.С. и др. Проблема понятия точности в кадастре недвижимости // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. № 2. С. 65–77. DOI:10.30533/GiA-2023-010.
6. Садакова В.В., Хныкина Т.С. Применение цифровых технологий в сфере регистрации объектов недвижимости: проблемы и ключевые тенденции // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сборник трудов Всероссийской научной и учебно-практической конференции: в 3 ч. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. Ч. 3. С. 316–321.
7. Larsson K., Paasch J., Paulsson J. Representation of 3D cadastral boundaries: From analogue to digital // Land Use Policy. 2020. Vol. 98. 104178. DOI:10.1016/j.landusepol.2019.104178.
8. Лисицкий Д.В., Чернов А.В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 2. С. 153–170.
9. Thompson R., Oosterom P., Karki S., et al. A Taxonomy of Spatial Units in a Mixed 2D and 3D Cadastral Database // FIG Working Week 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_20.pdf (дата обращения: 07.11.2023).
10. Lemmen C., van Oosterom P., Bennett R. The land administration domain model // Land Use Policy. 2015. Vol. 49. P. 535–545. DOI:10.1016/j.landusepol.2015.01.014.
11. Atazadeh B., Rajabifard A., Zhang Y., et al. Querying 3D Cadastral Information from BIM Models // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8. No. 8. P. 329–342. DOI:10.3390/ijgi8080329.
12. Barzegar M., Rajabifard A., Kalantari M., et al. An IFC-based database schema for mapping BIM data into a 3D spatially enabled land administration database // International Journal of Digital Earth. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 736–765. DOI:10.1080/17538947.2021.1875062.
13. Paasch J.M., Paulsson J. Trends in 3D cadaster — A literature survey // Land Use Policy. 2023. Vol. 131. No. 8. P. 172–194. DOI:10.1016/j.landusepol.2023.106716.
14. Беляев В.Л., Романов В.М., Снежко И.И. Совершенствование государственного учета и регистрации прав на подземные объекты недвижимости в 3d-кадастре: мировая практика и ситуация в России // Труды научного конгресса 20-го Международного научно-промышленного форума. 2018. № 1. С. 375–378.
15. Oosterom P. van, Stoter J., Ploeger H., et al. Initial Analysis of the Second FIG 3D Cadastres Questionnaire: Status in 2014 and Expectations for 2018 // Proceedings of 4th International Workshop on 3D Cadastres. Dubai, 2014. P. 55–74. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gdmc.nl/publications/2014/Second_FIG_3D_Cadastres_Questionnaire.pdf (дата обращения: 18.09.2024).
16. Kalogianni E., Oosterom P. van, Lemmen C., et al. Initial Analysis of the 3D Land Administration: Current Status (2022) and Expectation for the Near Future (2026) — Initial Analysis // FIG Working Week 2023. P. 1–15. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:0bcaa237-1014-4390-a849-904a1d43e28f> (дата обращения: 18.09.2024).
17. Stoter J., Ploeger H., Roes R., et al. Registration of Multi-Level Property Rights in 3D in The Netherlands: Two Cases and Next Steps in Further Implementation // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2017. Vol. 6. 158. DOI:10.3390/ijgi6060158.
18. El-Mekawy M., Paasch J., Paulsson J. The Integration of 3D Cadastre, 3D property formation and BIM in Sweden // Proceedings of the 4th International FIG 3D Cadastre Workshop. Dubai, 2014. P. 17–34. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fig.net/resources/proceedings/2014/2014_3dcadastre/3Dcad_2014_12.pdf (дата обращения: 18.09.2024).
19. Oosterom van P. Research and development in 3D cadastres // Computers, Environment and Urban Systems. 2013. Vol. 40. P. 1–6. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2013.01.002.
20. Larsson K., Paasch J., Paulsson J. Representation of 3D cadastral boundaries: From 748 analogue to digital // Land Use Policy. 2020. Vol. 98. 104178. DOI:10.1016/j.landusepol.2019.104178.
21. Чуприн М.С. Уровень проработки модели объекта недвижимости для включения в трехмерный кадастр с учетом правил информационного моделирования в строительстве // Приложение к журналу «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2020. № 11. С. 165–167.

22. Sun J., Olsson P., Eriksson H., et al. Evaluating the geometric aspects of integrating BIM data into city models // Journal of Spatial Science. 2020. Vol. 65. No. 2. P. 235–255. DOI:10.1080/14498596.2019.1636722.
23. Kutzner T., Kolbe T. CityGML 3.0: Sneak Preview // Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V / T.P. Kersten, E. Gülch, J. Schiewe, et al. (eds.). Munich, 2018. P. 835–839.
24. Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., et al. Applications of 3D City Models: State of the Art Review // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2015. Vol. 4. No. 4. P. 2842–2889. DOI:10.3390/ijgi4042842.
25. Borrmann A., Beetz J., Koch C., et al. Industry Foundation Classes: A Standardized Data Model for the Vendor-Neutral Exchange of Digital Building Models // Building Information Modeling. 2018. Vol. 2. P. 262–287. DOI:10.1007/978-3-319-92862-3_5.
26. Deng Y., Cheng J., Anumba C. Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison // Automation in Construction. 2016. Vol. 6. P. 1–21. DOI:10.1016/j.autcon.2016.03.006.
27. Аврунев Е.И., Гиниятов А.И. Современное состояние и проблемы геодезического обеспечения создания и ведения трехмерного кадастра недвижимости // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов III Национальной научно-практической конференции (Новосибирск, 27–29 ноября 2019 г.): в 2 ч. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. Ч. 1. С. 136–140. DOI:10.33764/2687-041X-2020-1-136-140.
28. Мирошникова В.В., Чернов А.В., Ершов А.В. Анализ возможности внедрения успешных, зарубежных технологических решений 3D кадастра в ЕГРН // Сборник материалов XIX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 17–19 мая 2023 г.): в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 7. № 2. С. 179–184.
29. Сейтвелиева А.С. Перспективы использования цифровых информационных моделей объектов реновации для целей кадастрового учета // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов VII Национальной научно-практической конференции (Новосибирск, 21–24 ноября 2023 г.): в 3 ч. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. Ч. 3. С. 72–80. DOI:10.33764/2687-041X-2024-3-72-80.
30. Киевский И.Л., Крутяков А.Ю., 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.

АВТОРЫ Тарарин Андрей Михайлович

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

Сейтвелиева Айна Сейтвелиевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
 кафедра управления недвижимостью и развитием территорий,
 факультет управления территориями

Поступила 17.10.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Analysis of the world's best practices for developing a 3D cadastre using BIM models and their implementation in Russia

Andrei M. Tararin¹, Ayna S. Seytvelieva¹✉

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ ainaocenka@gmail.com

CITATION Tararin AM, Seytvelieva AS. Analysis of the world's best practices for developing a 3D cadastre using BIM models and their implementation in Russia. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 108–123. DOI:10.30533/GiA-2025-017.

KEYWORDS 3D cadaster, BIM models, IFC, CityGML, IndoorGML, LandInfra/InfraGML

ABSTRACT The article discusses the technical aspects of the formation of a three-dimensional cadastre by integrating information models of capital construction objects. Positive foreign experience in the formation of a 3D cadastre using digital information models of real estate is presented. The features of maintaining the domestic real estate cadastre are given in order to implement digital information models of real estate in Russian conditions. The main international strategic documents in the field of real estate cadastre are analyzed. The importance of data from the information model of capital construction projects is noted, and their main characteristics are described. The content of international open standards used for managing and exchanging geospatial data is analyzed. The level of development of domestic software in the field of information modeling technologies for capital construction projects slows down the processes of integrating information models into cadastral information systems. For 3D cadastral visualization, integration methods for creating 3D cadastral models are considered: direct or indirect. In the second approach, the scenario for the development of the domestic cadastre is shown through linking cadastral information as a legal model with a physical model with a detailed description of the building elements to determine three-dimensional cadastral boundaries, accurately creating three-dimensional cadastral models. When approving the requirements for the content of the information model of capital construction projects, it is necessary to consider possible ways of interdepartmental interaction between government agencies in the field of urban planning. At the stage of approving the requirements for information models of capital construction projects, interoperability is considered in the light of the development of cadastral systems, since registration of rights to real estate and cadastral registration of a property are key components of real estate management.


REFERENCES

1. Romanov VM, Troitskaya VO. Issledovanie mirovoj praktiki voprosa formirovaniya I razvitiya 3D kadastra v INTERNET prostranstve s pomoshh'ju portal'nyh tehnologij i poiskovyh sistem [Research of world practice on the formation and development of 3D cadastre in the INTERNET space using portal technologies and search engines]. *Proceedings of the 8th regional scientific and practical conference "Culture of territory management: economic and social aspects, cadastre and geoinformatics"*. Nizhny Novgorod: NNSUACE; 2020: 50–56. (In Russian).
2. Vandyshva N, Ivanov A, Pakhomov S, et al. Design of the 3D Cadastre Model and Development of the Prototype in the Russian Federation. *Proceedings 2nd International Workshop on 3D Cadastres*. Delft; 2011: 355–375.
3. Stoter J, van Oosterom P, Ploeger H. The phased 3D cadastre implementation in the Netherlands. *Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Cadastres*. Shenzhen; 2012: 201–218.
4. Tararin AM, Belyaev VL. Prostranstvennye dannye v gradostroitel'noj dejatel'nosti [Spatial data in urban planning]. *Geodesy and Cartography*. 2020;11: 29–39. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2020-965-11-29-39.
5. Atamanov SA, Grigoriev SA, Kosarukov ZS, et al. Problema ponjatija tochnosti v kadastre nedvizhimosti [The problem of the concept of accuracy in the real estate cadaster]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotogrammetry*. 2023;67(2): 65–77. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-010.
6. Sadakova VV, Khnykina TS. Primenenie cifrovyyh tehnologij v sfere registracii objectov nedvizhimosti: problemy i ključevye tendencii [Application of digital technologies in the field of registration of real estate objects: problems and key trends]. *Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade: Proceedings of the All-Russian scientific and educational-practical conference*. In 3 parts. Part 3. Saint Petersburg: Polytech-Press; 2020: 316–321. (In Russian).
7. Larsson K, Paasch J, Paulsson J. Representation of 3D cadastral boundaries: From analogue to digital. *Land Use Policy*. 2020;98: 104178. DOI:10.1016/j.landusepol.2019.104178.
8. Lisitsky DV, Chernov AV. Teoreticheskie osnovy trehmernogo kadastra objectov nedvizhimosti [Theoretical foundations of the three-dimensional cadaster of real estate objects]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(2): 153–170. (In Russian).
9. Thompson R, Oosterom P, Karki S, et al. A Taxonomy of Spatial Units in a Mixed 2D and 3D Cadastral Database. *FIG Working Week 2015*. Available from: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_20.pdf (Accessed 7 November 2023).
10. Lemmen C, van Oosterom P, Bennett R. The land administration domain model. *Land Use Policy*. 2015;49: 535–545. DOI:10.1016/j.landusepol.2015.01.014.
11. Atazadeh B, Rajabifard A, Zhang Y, et al. Querying 3D Cadastral Information from BIM Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019;8(8): 329–342. DOI:10.3390/ijgi8080329.
12. Barzegar M, Rajabifard A, Kalantari M, et al. An IFC-based database schema for mapping BIM data into a 3D spatially enabled land administration database. *International Journal of Digital Earth*. 2021;14(6): 736–765. DOI:10.1080/17538947.2021.1875062.
13. Paasch JM, Paulsson J. Trends in 3D adaster — A literature survey. *Land Use Policy*. 2023;131(8): 172–194. DOI:10.1016/j.landusepol.2023.106716.
14. Belyaev VL, Romanov VM, Snezhko II. Sovershenstvovanie gosudarstvennogo ucheta i registracii prav na podzemnye objecty nedvizhimosti v 3d-kadastre: mirovaja praktika i situacija v Rossii [Improvement of state accounting and registration of rights to underground real estate objects in the 3d-cadaster: world practice and the situation in Russia]. *Proceedings of the Scientific Congress of the 20th International Scientific and Industrial Forum*. 2018;1: 375–378. (In Russian).
15. Oosterom P van, Stoter J, Ploeger H, et al. Initial Analysis of the Second FIG 3D Cadastres Questionnaire: Status in 2014 and Expectations for 2018. *Proceedings of 4th International Workshop on 3D Cadastres*. Dubai; 2014: 55–74. Available from: http://www.gdmc.nl/publications/2014/Second_FIG_3D_Cadastres_Questionnaire.pdf (Accessed 18 September 2024).
16. Kalogianni E, Oosterom P van, Lemmen C, et al. Initial Analysis of the 3D Land Administration: Current Status (2022) and Expectation for the Near Future (2026) — Initial Analysis. *FIG Working Week 2023*. Available from: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:0bcaa237-1014-4390-a849-904a1d43e28f> (Accessed 18 September 2024).

17. Stoter J, Ploeger H, Roes R, et al. Registration of Multi-Level Property Rights in 3D in The Netherlands: Two Cases and Next Steps in Further Implementation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2017;6: 158. DOI:10.3390/ijgi6060158.
18. El-Mekawy M., Paasch J., Paulsson J. The Integration of 3D Cadastre, 3D property formation and BIM in Sweden. *Proceedings of the 4th International FIG 3D Cadastre Workshop*. Dubai; 2014: 17–34. Available from: https://fig.net/resources/proceedings/2014/2014_3dcadastre/3Dcad_2014_12.pdf (Accessed 18 September 2024).
19. Oosterom van P. Research and development in 3D cadastres. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2013;40: 1–6. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2013.01.002.
20. Larsson K, Paasch J, Paulsson J. Representation of 3D cadastral boundaries: From 748 analogue to digital. *Land Use Policy*. 2020;98: 104178. DOI:10.1016/j.landusepol.2019.104178.
21. Chuprin MS. Uroven' prarobotki modeli ob'ekta nedvizhimosti dlja vkljuchenija v trehmernyj kadastr s uchetom pravil informacionnogo modelirovanija v stroitel'stve [The level of elaboration of the model of a real estate object for inclusion in a three-dimensional cadastre, taking into account the rules of information modeling in construction]. *Supplement to the journal "Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying". Collection of articles based on the results of the scientific and technical conference*. 2020;11: 165–167. (In Russian).
22. Sun J, Olsson P, Eriksson H, et al. Evaluating the geometric aspects of integrating BIM data into city models. *Journal of Spatial Science*. 2020;65(2): 235–255. DOI:10.1080/14498596.2019.1636722.
23. Kutzner T, Kolbe T. CityGML 3.0: Sneak Preview. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.* Kersten TP, Gülch E, Schiewe J, et al. (eds.). Munich, 2018: 835–839.
24. Biljecki F, Stoter J, Ledoux H, et al. Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2015;4(4): 2842–2889. DOI:10.3390/ijgi4042842.
25. Borrmann A, Beetz J, Koch C, et al. Industry Foundation Classes: A Standardized Data Model for the Vendor-Neutral Exchange of Digital Building Models. *Building Information Modeling*. 2018;2: 262–287. DOI:10.1007/978-3-319-92862-3_5.
26. Deng Y, Cheng J, Anumba C. Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison. *Automation in Construction*. 2016;6: 1–21. DOI:10.1016/j.autcon.2016.03.006.
27. Avrunev EI, Giniyatov AI. Sovremennoe sostojanie i problemy geodezicheskogo obespechenija sozdaniya i vedenija trehmernogo kadastra nedvizhimosti [The current state and problems of geodetic support for the creation and maintenance of a three-dimensional real estate cadaster]. *Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference (Novosibirsk, November 27–29, 2019)*. In 2 parts. Part 1. Novosibirsk: SSUGT; 2020: 136–140. (In Russian). DOI:10.33764/2687-041X-2020-1-136-140.
28. Miroshnikova VV, Chernov AV, Ershov AV. Analiz vozmozhnosti vnedrenija uspeshnyh, zarubezhnyh tehnologicheskikh reshenij 3D kadastra v EGRN [Analysis of the possibility of introducing successful, foreign technological solutions of 3D-cadaster in the EGRN]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XIX International scientific congress (Novosibirsk, May 17–19, 2023)*. In 8 vols. Vol. 7. Part 2. Novosibirsk: SSUGT; 2023: 179–184. (In Russian).
29. Seytvelieva AS. Perspektivy ispol'zovanija cifrovyyh informacionnyh modelej ob'ektov renovacii dlja celej kadastravogo ucheta [Prospects of using digital information models of renovation objects for the purposes of cadastral accounting]. *Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions: Proceedings of the VII National Scientific and Practical Conference (Novosibirsk, November 21–24, 2023)*. In 3 parts. Part 3. Novosibirsk: SSUGT; 2024: 72–80. (In Russian). DOI:10.33764/2687-041X-2024-3-72-80.
30. Kievsky IL, Krutyakov AYu, Ivanova OA, et al. Opyt ispol'zovanija otechestvennyh i importnyh BIM-produktov pri proektirovanii zhilyh zdaniy [The experience of using domestic and imported BIM products in the design of residential buildings]. *Industrial and Civil Construction*. 2020;11: 42–48. (In Russian). DOI:10.33622/0869-7019.2020.11.42-48.

AUTHORS **Andrei M. Tararin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Real Estate Management and Territory Development,
Faculty of Territory Management
PhD in Engineering

 0000-0003-2460-4434

Ayna S. Seytvelieva

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Real Estate Management and Territory Development,
Faculty of Territory Management

Submitted: October 17, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Выбор оптимальной методики идентификации угодий на землях сельскохозяйственного назначения с использованием нейронных сетей

Д.А. Гура^{1,2}✉, Р.А. Дьяченко^{1,3}, А.М. Барышева¹,
А.А. Коломыцев¹, В.В. Довгаль¹

¹ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

² Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉ gda-kuban@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Барышева А.М., Коломыцев А.А., Довгаль В.В. Выбор оптимальной методики идентификации угодий на землях сельскохозяйственного назначения с использованием нейронных сетей // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 124–138. DOI:10.30533/GiA-2025-029.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА земли сельскохозяйственного назначения, идентификация угодий, виноградные насаждения, ИНС, детекция изображений, искусственный интеллект, Mask R-CNN, YOLOv8, YOLOv5, метрики, mAP, Precision, Recall

АННОТАЦИЯ Представлены результаты исследования по выбору оптимальной нейронной сети для идентификации угодий на землях сельскохозяйственного назначения на примере виноградных насаждений в целях актуализации ведения государственного реестра земель сельскохозяйственного назначения. Основная задача идентификации угодий — выявить расхождения между информацией федерального реестра виноградных насаждений об использовании земельных участков и их фактическим состоянием. Для проведения экспериментов были выбраны нейросети YOLOv5, YOLOv8, Mask R-CNN, чаще всего применяемые для распознавания объектов на изображениях. Нейросети предлагают передовые методы анализа изображений, применимые для автоматизированной идентификации виноградных насаждений на землях сельскохозяйственных угодий. Эффективность их работы по задаче детекции определена с помощью вычисления метрик Precision, Recall и mAP на валидационном наборе данных. В исследовании представлены результаты сравнения моделей YOLOv5, YOLOv8, Mask R-CNN, по которым можно отследить эффективность их работы. Сравнение моделей показало, что для набора изображений земельных участков с угодьями на примере

виноградных насаждений модель YOLOv5 предпочтительнее в отношении задач, требующих постепенного улучшения с увеличением числа эпох, в то время как Mask R-CNN обеспечивает стабильные высокие результаты даже при небольшом количестве эпох. YOLOv8 существенно отстает по всем показателям, особенно на ранних этапах, и демонстрирует самую низкую производительность.

1 Введение

Достоверность сведений по учету земельных участков на землях сельскохозяйственного назначения с учетом вида угодий важна для устойчивого развития страны [1]. Необходимо владеть актуальной информацией о состоянии земель сельскохозяйственного назначения и, в частности, о землях, которые когда-либо использовались для того или иного сельскохозяйственного угодья (пашни, пастбища, многолетние насаждения, например виноградные), сейчас используются и потенциально могли бы использоваться в будущем [2].

Данный вопрос является актуальным в связи с постановлением Правительства РФ от 2 февраля 2023 года № 154 «О порядке ведения государственного реестра земель сельскохозяйственного назначения»¹ и статьей 15.1 Федерального закона № 101-ФЗ «О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения»². В данном исследовании объектом выступают земельные участки, занятые сельскохозяйственными угодьями, на примере виноградных насаждений. Отдельно необходимо отметить важность проведения мероприятий по учету виноградных насаждений на земельных участках. Нормативно данный вопрос отражен в Федеральном законе № 468-ФЗ «О виноградарстве и виноделии в Российской Федерации»³. Согласно данному закону, работы по учету и оценке соответствия состояния земельных участков сельскохозяйственного назначения, занятых виноградными насаждениями, данным федерального реестра осуществляет специально уполномоченный орган исполнительной власти (в рабочие группы по учету особо ценных земель вошли представители региональных департаментов имущественных отношений, архитектуры и градостроительства, а также Министерства сельского хозяйства). Основная задача учета — выявить расхождения между информацией федерального реестра виноградных насаждений и их фактическим состоянием [3].

Виноградарство как одна из ключевых отраслей агропромышленного комплекса требует комплексного управления для обеспечения высокого качества продукции. Выявление и мониторинг земельных участков, занятых виноградными насаждениями, является важной задачей, решение которой может существенно улучшить управление ресурсами, планирование урожаев [4, 5]. Для сбора информации о земельных участках, занятых виноградными насаждениями, могут применяться различные средства фото- и видеофиксации, а также технологии лазерного сканирования с применением лидаров и беспилотных воздушных судов [6, 7]. Обработка изображений и точек лазерного отражения планируется с применением систем, основанных на нейронных сетях [8]. Существующие нейронные сети, такие как Mask R-CNN, YOLOv5 и YOLOv8,

1 Постановление Правительства Российской Федерации от 2 февраля 2023 г. № 154 «О порядке ведения государственного реестра земель сельскохозяйственного назначения». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/145983> (дата обращения: 15.11.2024).

2 Федеральный закон от 16 июля 1998 г. № 101-ФЗ «О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12650> (дата обращения: 15.11.2024).

3 Федеральный закон от 27 декабря 2019 г. № 468-ФЗ «О виноградарстве и виноделии в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 1 марта 2024 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_370480/29c722a2e14ced463ec3d6cb6cbeb97df5ef355e/#dst100010 (дата обращения: 15.11.2024).

предлагают передовые методы анализа изображений, которые могут быть применены для автоматизированной идентификации виноградных насаждений [9].

На сегодняшний день опубликован целый ряд работ по идентификации земель, в том числе земель сельскохозяйственного назначения [10, 11]. При этом вопросам выбора архитектуры нейронной сети для идентификации земельных участков, занятых виноградными насаждениями, уделено недостаточное внимание [12]. Проблематика исследования заключается в объеме материалов, требующих разметки данных для обучающих наборов, длительности процесса обучения нейронной сети, объеме экспериментальной части, сложности рассматриваемых архитектур нейронной сети, адаптации иерархии наборов данных [13].

Таким образом, целью работы является выбор оптимальной нейронной сети для идентификации земельных участков, занятых виноградными насаждениями. Для решения данной проблемы необходимо провести анализ указанных выше нейронных сетей относительно метрик mAP, Precision, Recall.

2 Материалы и методы

Исследование направлено на оценку эффективности трех современных моделей машинного обучения — YOLOv5, YOLOv8 и Mask R-CNN — применительно к задаче обнаружения земельных участков с виноградными насаждениями на изображениях. Для реализации задач обнаружения объектов в данном исследовании используются модели YOLOv5 и YOLOv8, которые доступны в открытом репозитории⁴. Для достижения цели в исследовании были выбраны следующие методы [9]:

- 1) подобрать датасеты виноградных насаждений, чтобы в дальнейшем можно было их идентифицировать на реальных фотографиях;
- 2) выполнить адаптацию иерархии датасетов;
- 3) выполнить обучение моделей на тестовых датасетах;
- 4) выполнить оценку полученных результатов на валидационных изображениях;
- 5) определить модели с наилучшими значениями метрик.

В современном сельском хозяйстве использование передовых технологий играет ключевую роль в повышении эффективности производства и оптимизации использования земельных ресурсов. Одной из таких инноваций является применение нейронных сетей для анализа земельных участков с целью определения и оптимизации посадки виноградных насаждений.

3 Результаты и обсуждение


3.1 Методы решения задачи исследования

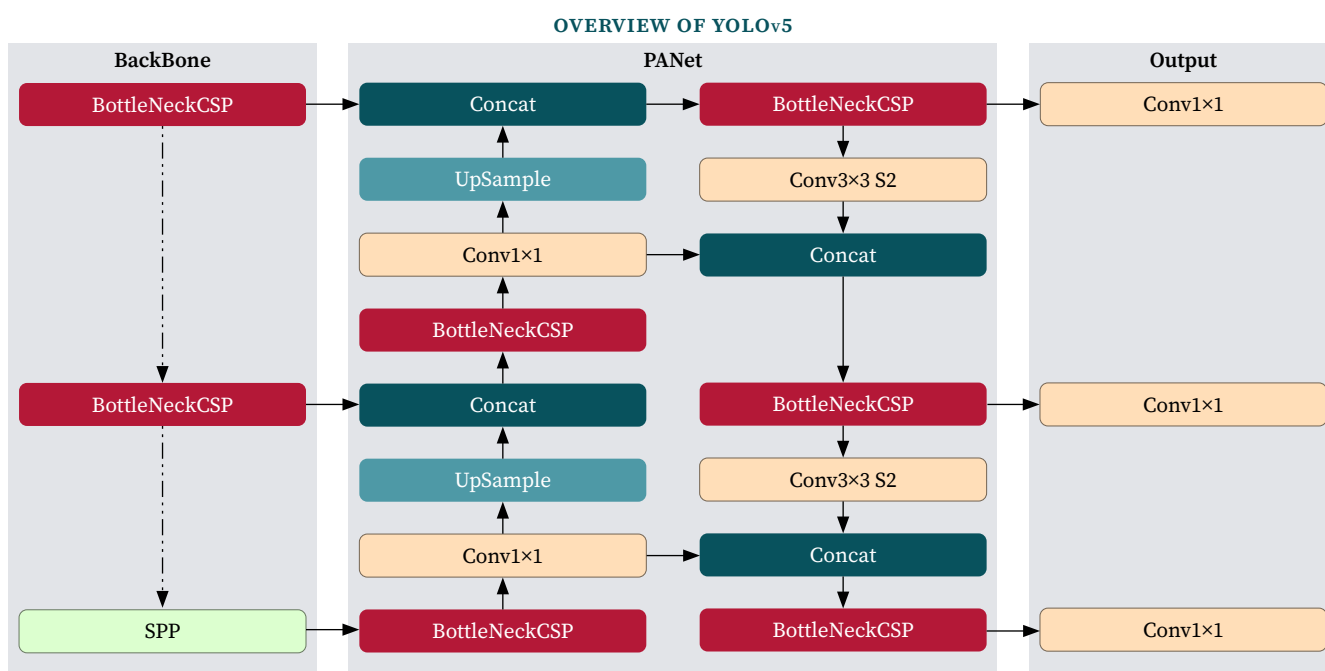
YOLOv5 — это модель машинного обучения, предназначенная для обнаружения объектов на изображениях и в видео. Она выделяется своей высокой скоростью и точностью. YOLOv5 относится к одноэтапным детекторам. Это означает, что она выполняет обнаружение объектов за один проход по изображению, в отличие от двухэтапных моделей, таких как Faster R-CNN или Mask R-CNN.

⁴ Ultralytics GitHub. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 03.02.2024).

Основной принцип работы YOLOv5 заключается в разделении изображения на сетку и предсказании прямоугольных рамок (*англ.* bounding boxes) и вероятностей классов объектов для каждой ячейки сетки. Сеть обучается предсказывать координаты рамок и соответствующие им классы объектов, используя прямой регрессионный подход. Архитектура YOLOv5 разделена на две части: backbone и head [9, 10].

В YOLOv5 используется архитектура CSP (*англ.* Cross Stage Partial Networks) [14] для backbone и PAN (*англ.* Path Aggregation Network) [15] для слияния признаков из различных уровней сети, что позволяет улучшить распознавание объектов разных масштабов. В процессе обучения YOLOv5 минимизирует ошибку предсказания bounding boxes (границ объектов) [12] и классов объектов, используя соответствующие функции потерь, такие как бинарная кросс-энтропия (*англ.* Binary Cross-Entropy) для классов и среднеквадратичная ошибка (*англ.* Mean Squared Error) для координат bounding boxes. Это помогает модели лучше различать объекты и точнее определять их местоположение на изображении. Архитектура YOLOv5 представлена на рис. 1.

Рис. 1 
 Архитектура YOLOv5
Fig. 1
 Architecture YOLOv5




Mask R-CNN — сверточная нейронная сеть, предназначенная для выполнения задач сегментации, а также обнаружения объектов на фотографиях [9]. Одной из ключевых характеристик Mask R-CNN является разделение всей архитектуры на ряд компонентов, включая сеть-основу (*англ.* backbone) [9, 10], сеть предложений регионов (*англ.* Region Proposal Network, RPN) [8, 14], голову детектора объектов и голову сегментации. Сеть-основа представляет собой мощную сверточную архитектуру, такую как ResNet, которая извлекает признаки из изображения. В процессе обработки изображение проходит через несколько слоев сверток и преобразований, что позволяет сети выделить ключевые признаки, необходимые для дальнейшей детекции и сегментации объектов.

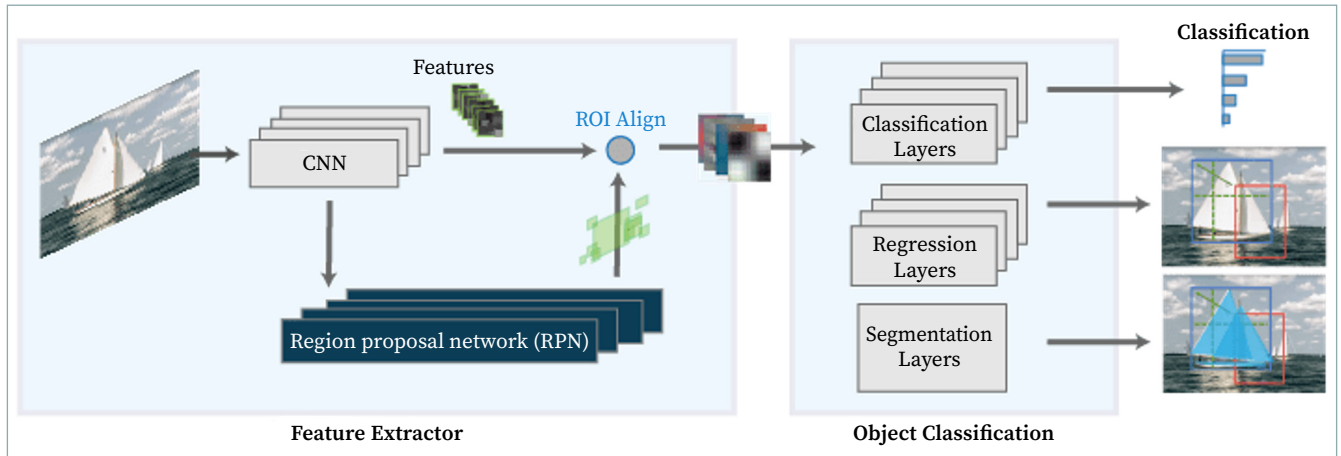
Сеть предложений регионов (RPN) [16] отвечает за генерацию предложений регионов, которые содержат объекты. Это промежуточный этап, который помогает сети сосредоточиться на наиболее значимых частях изображения. Данная сеть производит множество прямоугольных регионов, среди которых затем выбираются те, которые с наибольшей вероятностью содержат объекты.

Следующим этапом является применение RoIAlign (*англ.* Region of Interest Align) [17], необходимое для точного выравнивания предложений регионов на карте признаков. Этот метод позволяет избежать проблем, связанных с интерполяцией при использовании RoIPool (*англ.* Region of Interest Pooling) [18], обеспечивая точные и стабильные маски объектов.

Голова детектора объектов предсказывает классы объектов и точные координаты bounding box для каждого обнаруженного объекта на изображении. Это позволяет не только определить, где находится объект, но и к какому классу он принадлежит.

Основная особенность Mask R-CNN заключается в наличии дополнительной головы для предсказания масок сегментации объектов. Эта часть архитектуры позволяет точно выделить контуры объектов на изображении, что особенно важно для задач с высокой детализацией. В рамках данного исследования была использована стандартная архитектура Mask R-CNN, изображенная на рис. 2⁵ [9, 18].

Рис. 2 
 Архитектура Mask R-CNN
Fig. 2
 Architecture Mask R-CNN



YOLOv8 представляет собой одну из последних версий архитектуры YOLO. Сеть позволяет обнаруживать объекты, классифицировать и сегментировать изображения [9, 19]. В архитектуру YOLOv8 входят два основных компонента: backbone и head [9]. В архитектуру базовой сети (backbone) и головы (head) сети YOLOv8 были внесены изменения [10], чтобы улучшить производительность модели [18]. В частности, улучшены методы свертки и нормализации, а также добавлены новые слои для лучшего извлечения признаков [19]. Архитектура YOLOv8 представлена на рис. 3⁶.

В целях определения наиболее результативной модели машинного обучения для работы с изображениями на одном и том же наборе данных обучались различные архитектуры нейронных сетей. Затем модели сравнивались по показателям Precision и Recall, которые рассчитывались на основе результатов обнаружения объектов на тестовых изображениях [9].

В исследовании ключевые метрики были получены на основании матрицы ошибок, которая показывает, насколько хорошо модель классификации справляется с предсказанием классов. Эта матрица представляет нормализованную версию ошибок, полученных при лучшей детекции с использованием модели YOLOv5, обученной на 50 эпохах (рис. 4).

В итоге лучшая матрица ошибок показала, что модель правильно предсказала 92 % объектов как виноградные насаждения, ошибочно классифицировала 8 % объектов, которые на самом деле являются виноградными насаждениями, как фон, правильно классифицировала 100 % объектов, которые действительно являются фоном, и не классифицировала фон как виноградные насаждения. В исследовании для оценки качества результатов были использованы метрики Precision, Recall и mean Average Precision (mAP) [9].

5 Getting Started with Mask R-CNN for Instance Segmentation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/getting-started-with-mask-r-cnn-for-instance-segmentation.html> (дата обращения: 10.10.2024).

6 Algorithm principles and implementation with YOLOv8. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/open-mmlab/mmyolo/blob/main/docs/en/recommended_topics/algorithm_descriptions/yolov8_description.md (дата обращения: 10.10.2024).

Рис. 3

Архитектура YOLOv8

Fig. 3

Architecture YOLOv8

YOLOv8

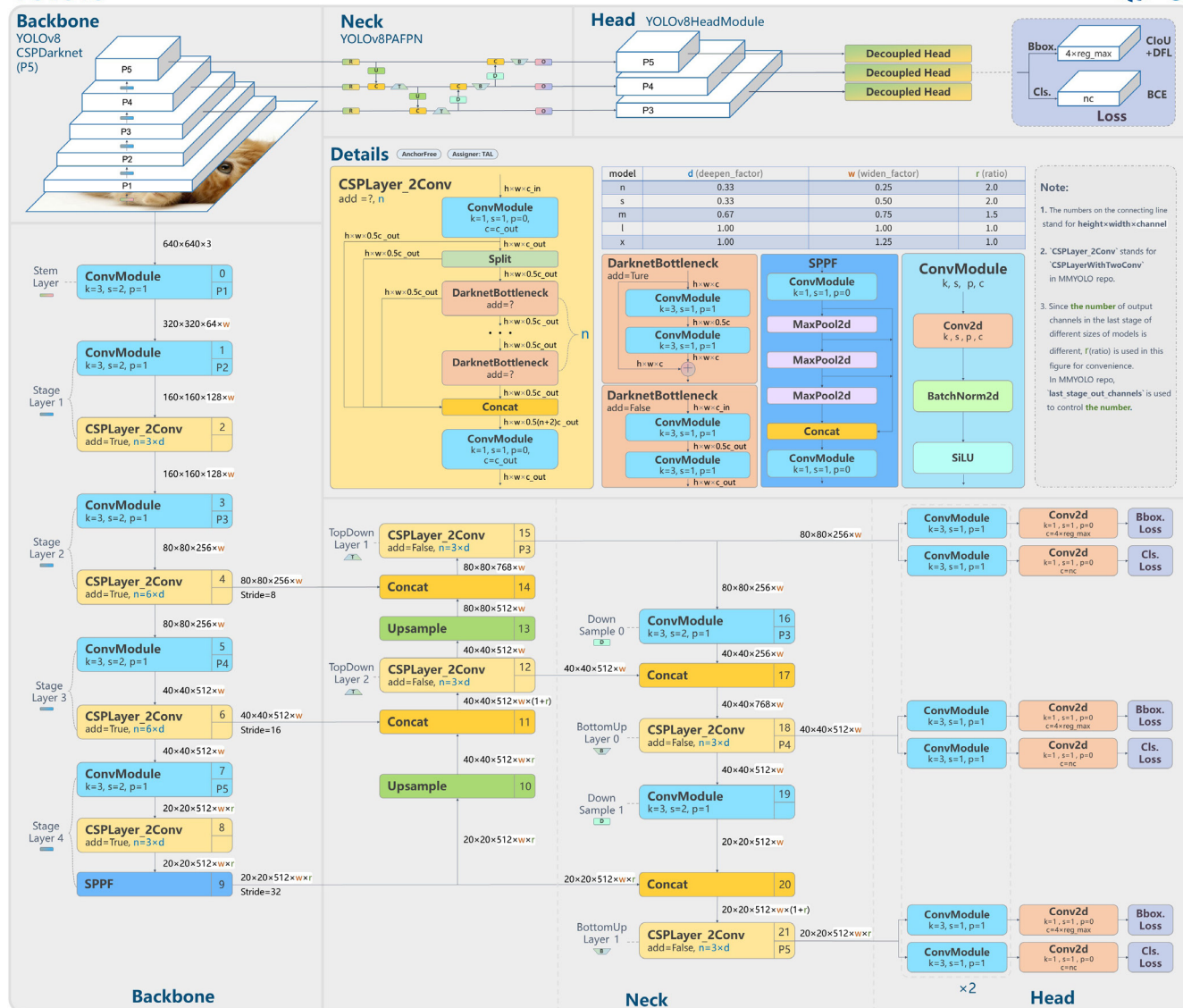
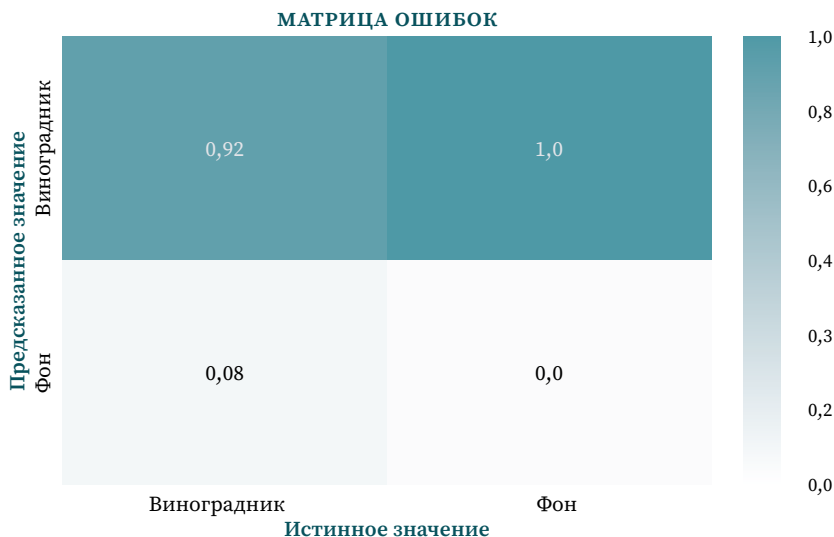


Рис. 4

Матрица ошибок для модели YOLOv5 на 50 эпохах

Fig. 4

Error matrix for the YOLOv5 model at 50 epochs



3.2 Результаты экспериментов


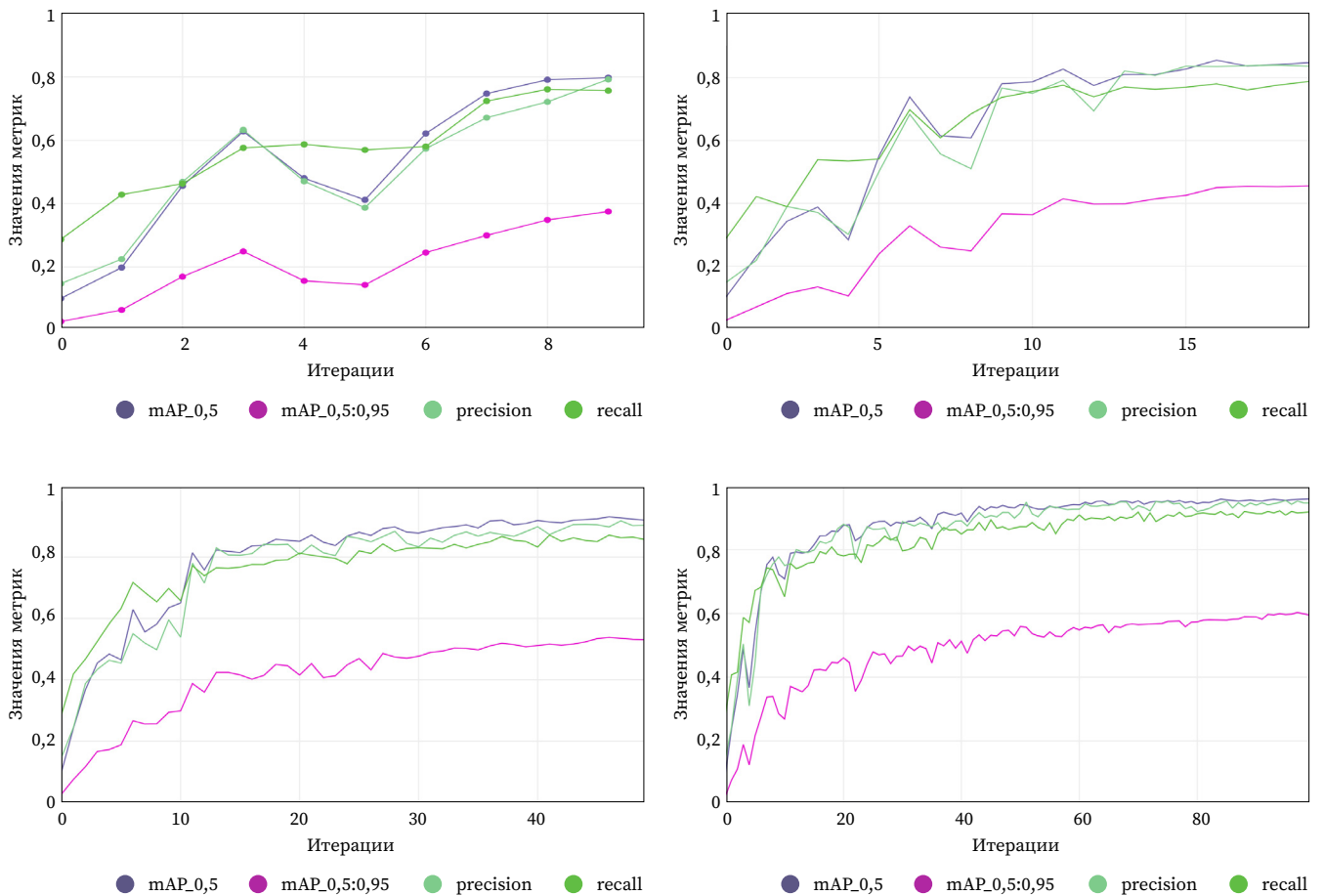
Рис. 5 
Показатели метрик для модели YOLOv5 в зависимости от количества эпох

Fig. 5
Metrics for the YOLOv5 model depending on the number of epochs

Для каждой полученной модели замеры метрик Precision, Recall и mAP проводились на 10, 20, 50 и 100 эпохах обучения [9]. Для обучения моделей применялась технология аугментации данных [20]. Были построены графики, демонстрирующие значения метрик Precision, Recall и mAP [21] на валидационных наборах данных при выбранных количествах эпох [9]. На рис. 5 представлен график, показывающий значения метрик для модели YOLOv5 в зависимости от количества эпох.



Объекты, которые были обнаружены на изображении с помощью обученной модели YOLOv5, приведены на рис. 6 [9].

На рис. 7 приведены показатели метрик для модели YOLOv8. Результат обнаружения объектов на изображении, полученный с помощью обученной модели YOLOv8, показан на рис. 8.

На рис. 9 показаны объекты, которые были обнаружены на изображении с помощью обученной модели Mask R-CNN [9].

График, демонстрирующий значения метрик для модели Mask R-CNN в зависимости от количества эпох, приведен на рис. 10.


Рис. 6 
Результаты детектирования моделью YOLOv5

Fig. 6
Detection results model YOLOv5

Рис. 7 

Показатели метрик для модели YOLOv8 в зависимости от количества эпох

Fig. 7

Metric indicators for YOLOv8 based on the number of epochs

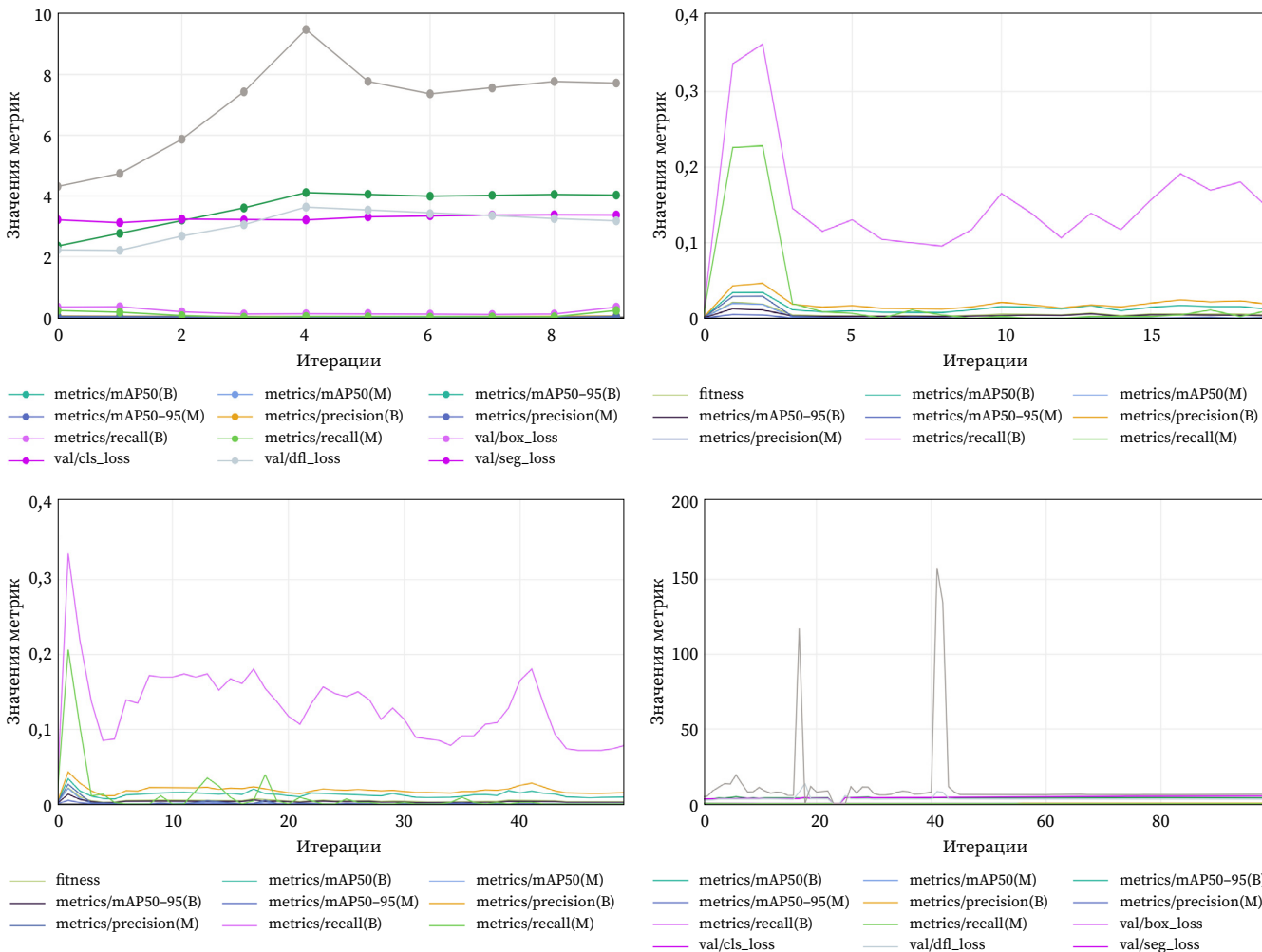


Рис. 8 

Результаты детектирования моделью YOLOv8

Fig. 8

Detection results model YOLOv8



Рис. 9 

Идентификация виноградных насаждений при помощи Mask R-CNN

Fig. 9

Identifying Grape Plantations Using Mask R-CNN

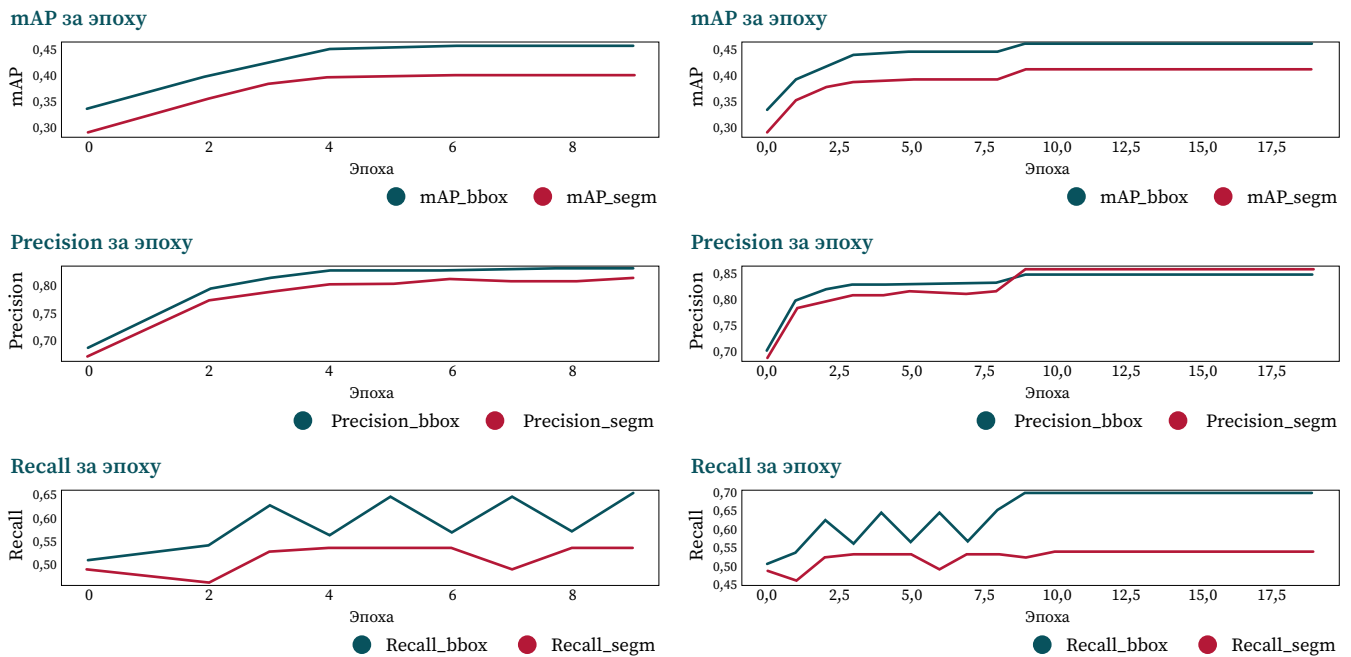


Рис. 10

Показатели метрик для модели Mask R-CNN в зависимости от количества эпох

Fig. 10

Metric indicators for Mask R-CNN based on the number of epochs



На основе полученных значений метрик составлена таблица сравнения для моделей Mask R-CNN, YOLOv5 и YOLOv8 [9] (табл. 1).

Таблица 1

Выявление наилучших параметров обучения моделей

Table 1

Identifying the best parameters for training models

Метрики	Архитектура	Показатель, количество эпох			
		10	20	50	100
Precision	YOLOv5	0,79	0,82	0,96	0,96
	YOLOv8	0,0427	0,043	0,0427	0,33
	Mask R-CNN	0,832	0,85	0,85	0,85
Recall	YOLOv5	0,75	0,79	0,85	0,92
	YOLOv8	0,33	0,34	0,3347	0,0022
	Mask R-CNN	0,655	0,7	0,72	0,72
mAP	YOLOv5	0,38	0,46	0,55	0,6
	YOLOv8	0,0125	0,013	0,0125	0,017
	Mask R-CNN	0,458	0,46	0,46	0,46

4 Выводы

Сравнение моделей YOLOv5, YOLOv8 и Mask R-CNN, результаты которого представлены в табл. 1, показало, что для набора изображений с виноградными насаждениями модель YOLOv5 может быть предпочтительнее в отношении задач, требующих постепенного улучшения с увеличением числа эпох, в то время как Mask R-CNN обеспечивает стабильные высокие результаты даже при небольшом количестве эпох. YOLOv8 существенно отстает по всем показателям, особенно на ранних этапах, и демонстрирует самую низкую производительность. При сравнении результатов исследования на 100 эпохах лучшие результаты при обучении показала нейронная сеть YOLOv5 по метрикам Precision — 96 %, Recall — 92 %, mAP — 60 %.

Таким образом, исследование показывает, что идентификация угодий на землях сельскохозяйственного назначения на примере виноградных насаждений в рамках актуального ведения государственного реестра земель сельскохозяйственного назначения может быть осуществлена при помощи распознавания образов с применением нейросетевых технологий. В рамках исследования были обучены модели YOLOv5, YOLOv8 и Mask R-CNN на одном наборе изображений, содержащем земельные участки с виноградными насаждениями в качестве целевых объектов. Эффективность их работы по задаче детекции была определена с помощью вычисления метрик Precision, Recall и mAP на валидационном наборе данных.


Проведенные исследования и полученные результаты будут полезны для трехмерной идентификации объектов недвижимости — процесса трехмерного отображения местности и объектов недвижимости, размещенных на ней; определения их геометрических параметров с целью учета, оценки и дальнейшего мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю. Автоматизированный технологический комплекс мониторинга и диагностики виноградников // Вестник аграрной науки Дона. 2021. Т. 4. № 56. С. 16–23.
2. Студенкова Н.А., Добротворская Н.И. Современные проблемы инвентаризации и кадастрового учета земель сельскохозяйственного назначения // Сборник материалов XVII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 3. № 2. С. 198–204. DOI:10.33764/2618-981X-2021-3-2-198-204.
3. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю. Нейросетевое автоматизированное детектирование признаков ухудшения состояния виноградных насаждений // Проблемы научной мысли. 2023. Т. 2. № 8. С. 48–55.
4. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю. Технология автоматизированного мониторинга состояния виноградника // Аграрная наука. 2023. № 3. С. 109–116. DOI:10.32634/0869-8155-2023-368-3-109-116.
5. Wang T., Gan V.J. Automated joint 3D reconstruction and visual inspection for buildings using computer vision and transfer learning // Automation in Construction. 2023. Vol. 149. 104810. DOI:10.1016/j.autcon.2023.104810.
6. Гура Д.А., Марковский И.Г., Пшидаток С.К. Методика мониторинга объектов недвижимости с помощью трехмерного лазерного сканирования в специфике городских земель // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 4. С. 45–53. DOI:10.22389/0016-7126-2021-970-4-45-53.
7. Dhanya V.G., Subeesh A., Kushwaha N.L., et al. Deep learning based computer vision approaches for smart agricultural applications // Artificial Intelligence in Agriculture. 2022. Vol. 6. P. 211–229. DOI:10.1016/j.aiaa.2022.09.007.
8. Дьяченко Р.А., Довгаль В.В., Гура Д.А. К вопросу сравнения эффективности нейронных сетей YOLOv8 и U-Net в задачах сегментации территориальных объектов // Информационные технологии. 2024. Т. 30. № 9. С. 480–485. DOI:10.17587/it.30.480-485.
9. Антюфеев В.В., Рябов В.А. Опыт агроклиматологического обоснования проектов плодовых насаждений в Северном Причерноморье в эпоху глобального потепления // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. Т. 4. № 66. С. 252–256.
10. Филонова М.А., Хорошко М.Б. Применение средств машинного зрения в виноградных хозяйствах: подготовка данных и обучение модели // Управление большими системами: сборник научных трудов XIX Всероссийской школы-конференции молодых ученых (Воронеж, 5–8 сентября 2023 г.). Воронеж: ВГТУ, 2023. С. 417–424.
11. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems (Lake Tahoe, Nevada, Dec. 2012). 2012. Vol. 1. P. 1097–1105.
12. Wang, C.Y., Bochkovskiy A., Liao H.Y.M. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer

- Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Seattle, WA, USA, 2020. P. 1571–1580. DOI:10.1109/CVPRW50498.2020.00203.
13. Liu S., Qi L., Qin H., et al. Path Aggregation Network for Instance Segmentation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Salt Lake City, UT, USA, 2018. P. 8759–8768. DOI:10.1109/CVPR.2018.00913.
 14. Ren S., He K., Girshick R., et al. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks // Proceedings of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (June 1, 2017). 2017. Vol. 39. No. 6. P. 1137–1149. DOI:10.1109/TPAMI.2016.2577031.
 15. Girshick R. Fast R-CNN // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Santiago, Chile, 2015. P. 1440–1448. DOI:10.1109/ICCV.2015.169.
 16. He K., Gkioxari G., Dollár P., et al. Mask R-CNN // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, Italy, 2017. P. 2980–2988. DOI:10.1109/ICCV.2017.322.
 17. Paletta Q., Terrén-Serrano G., Nie Y., et al. Advances in solar forecasting: Computer vision with deep learning // Advances in Applied Energy. 2023. Vol. 11. 100150. DOI:10.1016/j.adapen.2023.100150.
 18. Talaat F.M., ZainEldin H. An improved fire detection approach based on YOLO-v8 for smart cities // Neural Comput & Applic. 2023. Vol. 35. P. 20939–20954. DOI:10.1007/s00521-023-08809-1.
 19. Липилин Д.А., Евтушенко Д.Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодара // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 3. С. 195–210. DOI:10.46698/VNC.2022.72.93.013.
 20. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Netrebin P.B., et al. Analysis of the bottom topography of the reservoir due to sediment trapping (according to the Krasnodar reservoir, Russia) // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 102–112.
 21. Chengjun Chen, Chunlin Zhang, Jinlei Wang, et al. Semantic segmentation of mechanical assembly using selective kernel convolution UNet with fully connected conditional random field // Measurement. 2023. Vol. 209. 112499. DOI:10.1016/j.measurement.2023.112499.


АВТОРЫ **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

Дьяченко Роман Александрович

✉ djachenko.roman@kubstu.ru
 ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия;
 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ), Краснодар, Россия
 кафедра автоматизации производственных процессов, Институт компьютерных систем и информационной безопасности
 д-р техн. наук, профессор
 0000-0003-1244-1228

Барышева Алиса Михайловна

✉ alisa_barysheva03@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ), Краснодар, Россия
 кафедра информационных систем и программирования, Институт компьютерных систем и информационной безопасности
 0009-0006-6163-0171

Коломыцев Арсений Александрович

✉ mills@inbox.ru

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

Краснодар, Россия

кафедра кадастра и геоинженерии, Институт строительства и транспортной

инфраструктуры

🆔 0000-0002-7981-0895

Довгаль Владислав Витальевич

✉ d.vlad.recom@gmail.com

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

Краснодар, Россия

кафедра информационных систем и программирования, Институт компьютерных

систем и информационной безопасности

🆔 0000-0003-1046-3335

Поступила 04.12.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Selection of the optimal method for identifying agricultural land using neural networks

Dmitry A. Gura^{1,2}✉, Roman A. Dyachenko^{1,3}, Alisa M. Barysheva¹, Arseny A. Kolomytsev¹, Vladislav V. Dovgal¹

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

² Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

✉ gda-kuban@mail.ru

CITATION Gura DA, Dyachenko RA, Barysheva AM, Kolomytsev AA, Dovgal VV. Selection of the optimal method for identifying agricultural land using neural networks. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 124–138. DOI:10.30533/GiA-2025-029.

KEYWORDS agricultural land plots, land plot identification, vineyards, neural networks (NN/ANN), image detection, artificial intelligence, Mask R-CNN, YOLOv8, YOLOv5, metrics, mAP, Precision, Recall


ABSTRACT The article presents the results of a study on the selection of an optimal neural network for identifying agricultural land plots, illustrated with vineyards, for updating the state agricultural land registry. The primary goal of the inventory is to detect any inconsistencies between the federal vineyard registry data and the vineyards' current condition. For the experiments, the YOLOv5, YOLOv8, and Mask R-CNN neural networks were selected as the most commonly used for the purposes of recognizing objects in images. Neural networks offer advanced methods of image analysis that can be used for automated identification of vineyards on agricultural land. Their performance in the detection task was determined by calculating the Precision, Recall, and mAP metrics on a validation data set. The results of the comparison of the YOLOv5, YOLOv8, and Mask R-CNN models are presented in the table, which can be used to track their effectiveness. A comparison of the models showed that for a set of agricultural land plot images with vineyards, the YOLOv5 model may be preferable for tasks that require gradual improvement with an increasing number of epochs, while Mask R-CNN provides consistent high results even with a small number of epochs. YOLOv8 lags significantly in all metrics, especially in the early stages, and demonstrates the lowest overall performance.

REFERENCES



1. Kuznetsov PN, Kotelnikov DYu. Avtomatizirovannyj tehnologicheskij kompleks monitoringa i diagnostiki vinogradnikov [Automated technological complex for monitoring and diagnostics of vineyards]. *Bulletin of agrarian science of the Don*. 2021;4(56): 16–23. (In Russian).
2. Studenkova NA, Dobrotvorskaya NI. Sovremennye problemy inventarizacii i kadaastrovogo ucheta zemel' sel'skhozajstvennogo naznachenija [Modern problems of inventory and cadastral registration of agricultural lands]. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021;3(2): 198–204. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2021-3-2-198-204.
3. Kuznetsov PN, Kotelnikov DYu, Voronin DYu. Nejrosetevoe avtomatizirovannoe detektirovanie priznakov uhudshenija sostojanija vinogradnyh nasazhdenij [Neural network automated detection of signs of deterioration of grape plantations]. *Problems of scientific thought*. 2023;2(8): 48–55. (In Russian).
4. Kuznetsov PN, Kotelnikov DYu, Voronin DYu. Tehnologija avtomatizirovannogo monitoringa sostojanija vinogradnika. *Agrarian science*. 2023;3: 109–116. (In Russian). DOI:10.32634/0869-8155-2023-368-3-109-116.
5. Wang T, Gan VJ. Automated joint 3D reconstruction and visual inspection for buildings using computer vision and transfer learning. *Automation in Construction*. 2023;149: 104810. DOI:10.1016/j.autcon.2023.104810.
6. Gura DA, Markovsky IG, Pshidatok SK. Metodika monitoringa ob'ektov nedvizhimosti s pomoshh'ju trehmernogo lazernogo skanirovanija v specifičke gorodskih zemel' [Methodology for monitoring real estate objects using three-dimensional laser scanning in the specifics of urban lands]. *Geodesy and Cartography*. 2021;82(4): 45–53. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2021-970-4-45-53.
7. Dhanya VG, Subeesh A, Kushwaha NL, et al. Deep learning-based computer vision approaches for smart agricultural applications. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022;6: 211–229. DOI:10.1016/j.iaia.2022.09.007.
8. Dyachenko RA, Dovgal VV, Gura DA. K voprosu sravnenija jeffektivnosti nejronnyh setej YOLOv8 i U-Net v zadachah segmentacii territorial'nyh ob'ektov [On the issue of comparing the efficiency of YOLOv8 and U-Net neural networks in the tasks of segmentation of territorial objects]. *Information technologies*. 2024;30(9): 480–485. (In Russian). DOI:10.17587/it.30.480-485.
9. Antyufeev VV, Ryabov VA. Opyt agroklimatologicheskogo obosnovanija proektov plodovyh nasazhdenij v Severnom Prichernomor'e v jepohu global'nogo poteplenija [Experience of agroclimatological substantiation of fruit planting projects in the northern Black Sea region in the era of global warming]. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2017;4(66): 252–256. (In Russian).
10. Filonova MA, Khoroshko MB. Primenenie sredstv mashinnogo zrenija v vinogradnyh hozjajstvah: podgotovka dannyh i obuchenie modeli [Application of machine vision tools in vineyards: data preparation and model training]. *Management of large systems: collection of scientific papers of the XIX All-Russian school-conference of young scientists (Voronezh, September 5–8, 2023)*. Voronezh: VSTU; 2023: 417–424. (In Russian).
11. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems (Lake Tahoe, Nevada, Dec. 2012)*. 2012;1: 1097–1105.
12. Wang CY, Bochkovskiy A, Liao HYM. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. Seattle, WA, USA; 2020: 1571–1580. DOI:10.1109/CVPRW50498.2020.00203.
13. Liu S, Qi L, Qin H, et al. Path Aggregation Network for Instance Segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Salt Lake City, UT, USA; 2018: 8759–8768. DOI:10.1109/CVPR.2018.00913.
14. Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *Proceedings of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (June 1, 2017)*. 2017;39(6): 1137–1149. DOI:10.1109/TPAMI.2016.2577031.
15. Girshick R. Fast R-CNN. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Santiago, Chile; 2015: 1440–1448. DOI:10.1109/ICCV.2015.169.
16. He K, Gkioxari G, Dollár P, et al. Mask R-CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Venice, Italy; 2017: 2980–2988. DOI:10.1109/ICCV.2017.322.

17. Paletta Q, Terrén-Serrano G, Nie Y, et al. Advances in solar forecasting: Computer vision with deep learning. *Advances in Applied Energy*. 2023;11: 100150. DOI:10.1016/j.adapen.2023.100150.
18. Talaat FM, ZainEldin H. An improved fire detection approach based on YOLO-v8 for smart cities. *Neural Comput & Applic*. 2023;35: 20939–20954. DOI:10.1007/s00521-023-08809-1.
19. Lipilin DA, Evtushenko DD. Ocenka kachestva gorodskoj sredy s primeneniem geoinformacionnyh sistem na primere mikrorajonov goroda Krasnodara [Assessment of the quality of the urban environment using geographic information systems on the example of microdistricts of the city of Krasnodar]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022;12(3): 195–210. (In Russian). DOI:10.46698/VNC.2022.72.93.013.
20. Pogorelov AV, Laguta AA, Netrobin PB, et al. Analysis of the bottom topography of the reservoir due to sediment trapping (according to the Krasnodar reservoir, Russia). *Geography, Environment, Sustainability*. 2023;16(3): 102–112.
21. Chengjun Chen, Chunlin Zhang, Jinlei Wang, et al. Semantic segmentation of mechanical assembly using selective kernel convolution UNet with fully connected conditional random field. *Measurement*. 2023; 209: 112499. DOI:10.1016/j.measurement.2023.112499.



AUTHORS **Dmitry A. Gura**

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



Roman A. Dyachenko

 djachenko.roman@kubstu.ru
 Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia;
 Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
 Department of Industrial Process Automation, Institute of Computer Systems and Information Security
 Dr. of Sci. (Engineering), Professor
 0000-0003-1244-1228



Alisa M. Barysheva

 alisa_barysheva03@mail.ru
 Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
 Department of Information Systems and Programming, Institute of Computer Systems and Information Security
 0009-0006-6163-0171

Arseny A. Kolomytsev

 mills@inbox.ru
 Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
 Department of Cadastre and Geoengineering, Institute of Construction and Transport Infrastructure
 0000-0002-7981-0895

Vladislav V. Dovgal

 d.vlad.recom@gmail.com
 Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
 Department of Information Systems and Programming, Institute of Computer Systems and Information Security
 0000-0003-1046-3335

Submitted: December 04, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.



Исследование метода сборки и юстировки компонентов оптических полюсов каналов оптоволоконной связи

Е.В. Осипов¹✉

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ egorosipov3440@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ Осипов Е.В. Исследование метода сборки и юстировки компонентов оптических полюсов каналов оптоволоконной связи // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 139–147. DOI:10.30533/GiA-2025-018.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА канал оптической связи, оптический полюс, коллиматорное устройство, оптические потери в канале связи

АННОТАЦИЯ Оптические полюсы являются основными элементами оптических соединителей, которые применяются в современных волоконно-оптических системах передачи информации. От точности юстировки и сборки оптических полюсов в значительной степени зависят эффективность и стабильность передачи оптического сигнала. Оптические полюсы являются передающими и приемными элементами оптического сигнала, обеспечивающими минимальные оптические потери, что критически важно для надежной передачи сигналов на больших расстояниях. В статье исследован метод сборки и юстировки отдельных компонентов оптических полюсов, которые применяются в каналах оптоволоконной связи. Проанализированы характеристики компонентов оптических полюсов, влияющие на оптические потери сигнала при его передаче через оптический канал. Рассчитана требуемая точность взаимного позиционирования компонентов оптических полюсов. Дано описание разработанного стенда и иных оптико-механических сборных элементов, которые были разработаны для достижения приемлемой точности взаимного позиционирования компонентов оптических полюсов исследуемым методом. Выполнена экспериментальная апробация исследованного метода. Получены результаты в виде собранной и отъюстированной конструкции оптического полюса, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами. Показан канал оптической связи, который состоит из оптических полюсов, полученных исследуемым методом, измерены основные характеристики данного канала. Результаты исследования позволяют создать оптический полюс и исключить применение механических элементов высокой точности обработки в конструкции полюса.

1 Введение

Оптический полюс (ОП) — «место ввода оптического излучения в компонент волоконно-оптической системы передачи или его вывода»¹. Оптическая система ОП включает оптическое волокно (ОВ) и коллиматорное устройство — сферическую линзу.

Выходной ОП — «место вывода оптического излучения из компонента волоконно-оптической системы передачи»². ОП применяют в системах волоконно-оптической связи [1], волоконно-оптических лазерных системах [2], оптоволоконных системах визуализации изображения [3], измерительных оптических системах [4, 5]. Выходной ОП, оканчивающийся коллиматорным устройством, выводит из волоконно-оптической системы передачи оптический сигнал и коллимирует его.

Входной ОП — «место ввода оптического излучения в компонент волоконно-оптической системы передачи»³. Входной ОП, оканчивающийся коллиматорным устройством, собирает входящий коллимированный пучок в волоконно-оптическую систему передачи. Выходной и входной ОП с коллиматорным устройством формируют канал оптической связи, который выступает основным элементом пассивных волоконно-оптических приборов, таких как волоконно-оптические переходы [6, 7].

Основной характеристикой канала оптической связи являются потери при передаче. Потери при передаче (через оптический канал) (*англ.* transmission loss [of an optical path]) — «потери в оптическом передающем канале, связывающем два соседних оптоэлектронных устройства, на определенной длине волны»⁴.

Потери в канале оптической связи (дБ) вычисляются следующим образом⁵:

1 ➤

$$B = -10 \lg \left(\frac{P_0}{P_{out}} \right),$$

где P_{out} — мощность оптического пучка, вышедшая из ОВ выходного ОП, дБ;

P_0 — мощность оптического пучка, вошедшая в ОВ входного ОП, дБ.

Оптические потери возникают в результате неточности компонентов ОП, погрешности сборки [8] и сферической аберрации коллиматорного устройства⁶. В результате перечисленных факторов пучок, вышедший из выходного ОП, будет расходящимся или сходящимся, а входной ОП будет собирать входящий в него оптический пучок не в сердцевину оптического волокна.

Низкая расходимость оптического пучка достигается высокоточным позиционированием ОВ относительно коллиматорного устройства. В статье исследуется метод сборки ОП, позволяющий юстировать ОВ относительно коллиматорного устройства с точностью 1 мкм в процессе сборки ОП, что достаточно для передачи оптического излучения через канал волоконной связи с низкими потерями. В настоящий момент отсутствуют научные источники, посвященные подобным исследованиям, поэтому тема статьи представляется актуальной.

Стоит отметить, что для каналов оптоволоконной связи, включающих в свой состав рассматриваемые оптические полюсы, на момент написания статьи отсутствуют государственные и международные стандарты, определяющие уровень допустимых оптических потерь. При разработке подобных устройств следует стремиться к минимальному уровню оптических потерь.

1 ГОСТ Р 54417-2011. Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. С. 1.

2 Там же.

3 Там же.

4 ГОСТ ИЕС 66050-731-2017. Международный электротехнический словарь. Глава 731. Волоконно-оптическая связь. М.: Стандартинформ, 2020. С. 4.

5 Бусурин В.И., Казарян А.В., Неретин Е.С. Оптические и волоконно-оптические устройства и системы: учеб. пособие / под ред. В.И. Бусурина. М.: Изд-во МАИ, 2015. 112 с.

6 Nicia A.J.A. Micro-optical devices for fiber communication. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1983. 85 p.

2 Материалы и методы

2.1 Анализ характеристик сборки и юстировки ОП

Для сведения к минимуму оптических потерь в канале связи проанализируем, с какой точностью нужно позиционировать ОВ относительно коллиматорного устройства. Для этого рассмотрим оптическую систему, показанную на рис. 1. При моделировании учитывались следующие факторы: диаметр сердцевины одномодового волокна (D_c) равен 9 мкм; максимальная числовая апертура одномодового волокна (NA) — 0,13; отражение света от линз не учитывается; мощность выходящего из ОВ оптического излучения (P_{out}) — 1 Вт. Параметры коллиматорного устройства: радиус $r_1 = 1,25$ мм, $r_2 = -1,25$ мм, $D_a = 2,5$ мм, $n_e = 1,51872$. Анализируемые ОП включают в свой состав одномодовое волокно, поэтому длины волн при моделировании соответствуют основным рабочим длинам волн этого типа волокна⁷: $\lambda_1 = 1,31$ мкм, $\lambda_2 = 1,55$ мкм.

Минимальное значение оптических потерь достигается при условии нахождения всех элементов рис. 1 на одной оси (рис. 2). Сместим оптическое волокно 1 выходного полюса по координатам x, y, z до получения оптических потерь на уровень 3 дБ = 50 % (рис. 2).


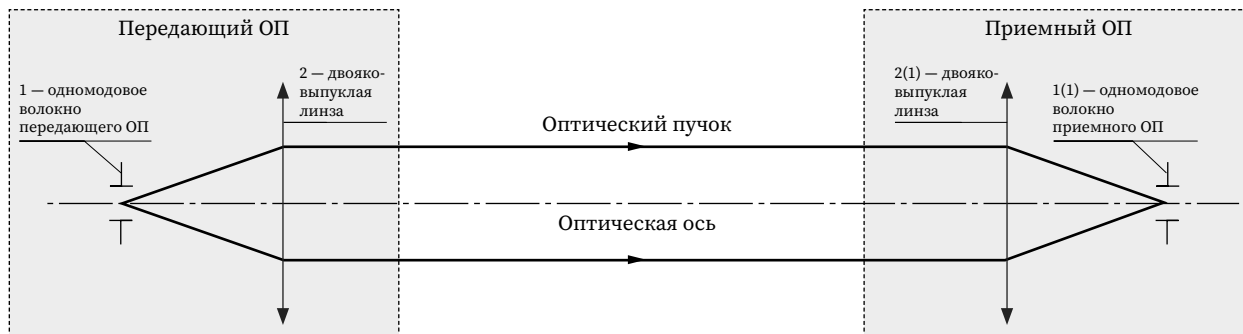
Рис. 1  Оптическая система канала оптической связи

Fig. 1 Optical system of the optical communication channel

Схема / Diagram



Модель в программе Zemax / Model in the Zemax program

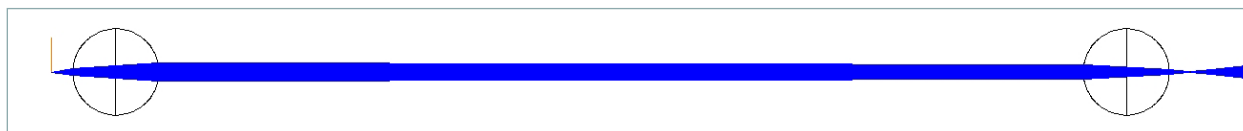



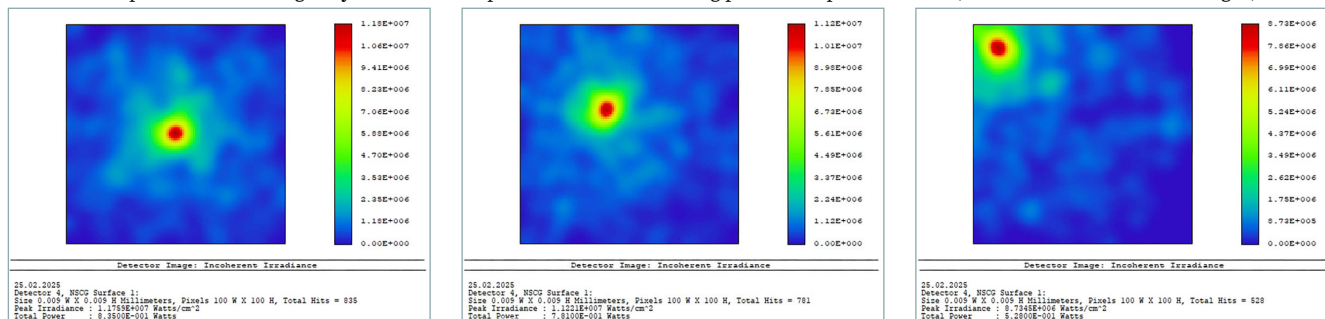
Рис. 2  Профиль оптического излучения, сведенного линзой в ОВ в приемном полюсе оптического канала (получено из модели рис. 1)

Fig. 2 Profile of an optical beam converged by a lens into an optical fiber at the receiving pole of an optical channel (obtained from the model in Fig. 1)



ОВ передающего канала находится на оптической оси / The optical fiber of the transmitting channel is on the optical axis

ОВ передающего канала смещено по координатам $x = 1$ мкм, $y = 1$ мкм от оптической оси / The optical fiber of the transmitting channel is shifted by coordinates $x = 1 \mu\text{m}$, $y = 1 \mu\text{m}$ from the optical axis

ОВ передающего канала смещено по координатам $x = 3,5$ мкм, $y = 3,5$ мкм от оптической оси / The optical fiber of the transmitting channel is shifted by coordinates $x = 3.5 \mu\text{m}$, $y = 3.5 \mu\text{m}$ from the optical axis

⁷ Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 106 с.

Из представленной модели видно, что смещение ОВ на 1 мкм (рис. 2) по двум координатам приводит к тому, что на волокно приемного ОП приходит $P_0 = 0,78$ Вт, при расчете по формуле (1) $B = 1,1$ дБ. Подобное смещение на 3,5 мкм (рис. 2) приводит к тому, что на волокно приемного ОП приходит $P_0 = 0,51$ Вт, при расчете по формуле (1) $B = 3$ дБ.

Представленная модель достаточно точно коррелирует с выражением, выведенным в [9]:

2 ➔

$$n_{\Delta r} = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{r} \exp(-ikr) \exp\left(-\frac{ikr^2}{2f}\right) \exp\left(-\left(r+\frac{\Delta r}{w_0}\right)\right) J_1(\pi D_a r / \lambda f) dr}{\int_0^\infty [J_1(\pi D_a r / \lambda f)]^2 / r dr \times \int_0^\infty \exp\left[-2\left(r+\frac{\Delta r}{w_0}\right)^2\right] r dr}$$

где $n_{\Delta r}$ — эффективность связи (англ. coupling efficiency);
 $\Delta r = \sqrt{x^2 + y^2}$ — смещение волокна по координатам x и y ;
 w_0 — радиус поля моды (4,5 мм);
 J_1 — функция Бесселя первого рода;
 D_a — диаметр фокусирующей линзы (2,5 мм);
 λ — длина волны лазерного источника излучения (1,55 мкм);
 f — фокусное расстояние линзы (1,865 мм для $\lambda = 1,55$ мкм).

Значение эффективности связи $n_{\Delta r}$ является значением потерь в канале связи. Так, если подставить в выражение (2) значение параметров модели (рис. 1), значение эффективности связи будет равно 0,5 при $\Delta r = 6,9$ мкм. Следовательно, одномодовое волокно не совпадает с осью линзы по координатам x и y на 4,8 мкм. Выражение (2) не учитывает расходимость оптического пучка, которая образуется в результате сферической аберрации линзы передающего ОП, поэтому значения координат волокна в модели (рис. 1) и выражении (2) различаются на 1,3 мкм.

Обеспечить необходимое положение ОВ в сборках ОП можно механическими элементами. Конструкция, включающая механические элементы, собирается по принципу насыпной сборки⁸. Подобный вид конструкции имеет ряд недостатков: применение механических элементов высокой точности обработки ввиду отсутствия возможности юстировки в процессе сборки, необходимость подбора пар из собранных ОП для стабильной работы канала связи на требуемом расстоянии.

Для того чтобы устранить недостатки сборки с механическими элементами, предлагается использовать метод, позволяющий производить юстировку в процессе сборки.

2.2 Метод сборки и юстировки по входящему оптическому пучку

Элементная база, из которых состоят ОП, юстируемые и собираемые по исследуемому методу, представлена на рис. 3.

Диаметр керамического наконечника 1,25 мм, наконечник имеет полировку по стандарту УРС. Линза имеет следующие параметры: радиус — 1,43 мм, диаметр — 1,3 мм, длина линзы по ее оптической оси — 3,06 мм. Линза выполнена из оптического стекла марки SF11.

Исследуемый метод производился по входящему в линзу коллимированному пучку. Для создания коллимированного пучка использовался опорный ОП. Схема сборки и юстировки по входящему оптическому пучку показана на рис. 4.

Опорный ОП 4 подключается к источнику оптического излучения. Он имеет единую базу с линзой 3, поскольку они зажаты во втулку 5 без возможности перемещения. Линза 3 собирает коллимированный пучок от линзы 4. Задача юстировки по данному методу — расположить ОВ в наконечнике керамическом относительно линзы так, чтобы оптические потери были минимальны.

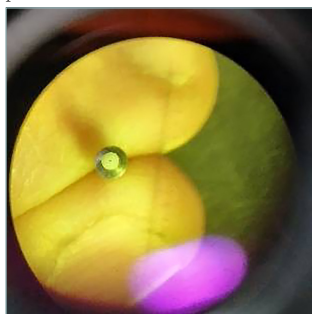
Рис. 3 ➔

Элементная база ОП

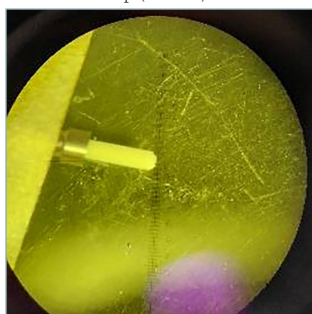
Fig. 3

Element base of the optical pole

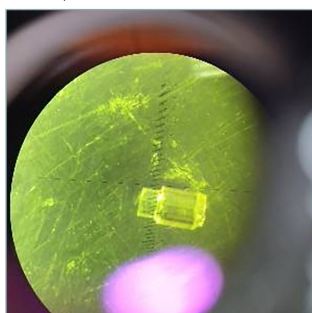
ОВ в наконечнике керамическом (феруле), вид в профиль / Optical fiber in a ceramic tip (ferrule) profile view



ОВ в наконечнике керамическом (феруле), вид сбоку / Optical fiber in a ceramic tip (ferrule) side view



Линза / Lens



8 Крынин Л.И. Проектирование конструкций объективов. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 219 с.

Рис. 4

Схема юстировки методом прямой юстировки

Fig. 4

Scheme of adjustment by the direct adjustment method

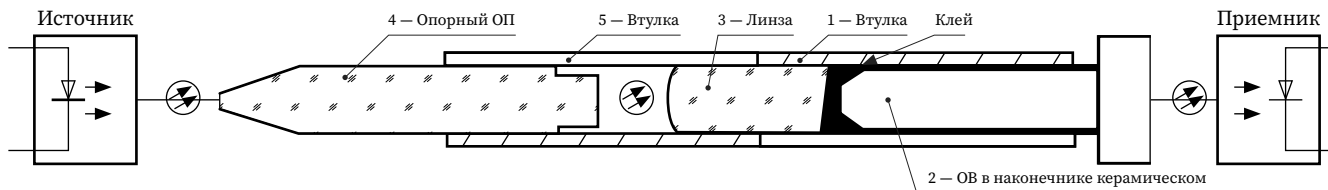


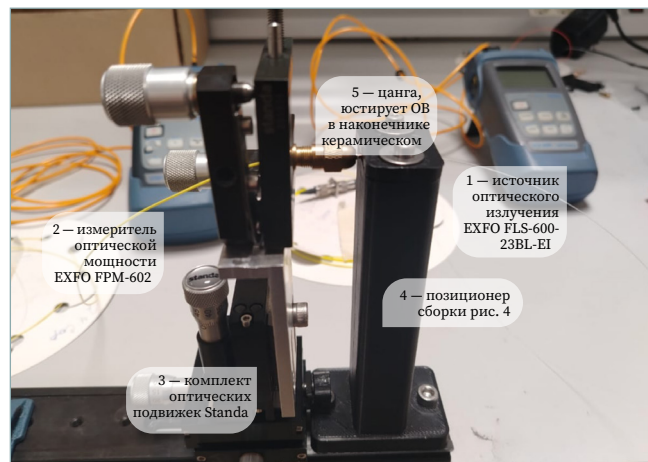
Рис. 5

Стенд для сборки методом прямой юстировки

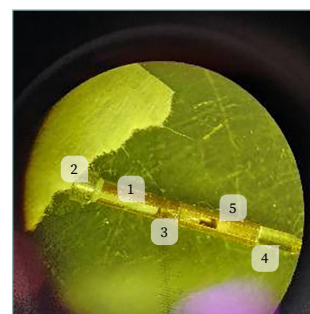
Fig. 5

Stand for assembly using the direct alignment method

Стенд / Stand



Часть стенда, базирующая линзу относительно опорного полюса, обозначенные позиции совпадают с позициями рис. 4 / Part of the stand, basing the lens relative to the support pole the designated positions coincide with the positions of fig. 4



Условием правильной юстировки является минимум оптических потерь, зафиксированный приемником оптического излучения. Юстировка производилась в прозрачном клее УФ-Полимер «5 секунд» ТУ 20.59.59-010-78719086-2017. Стенд, собранный для метода прямой юстировки, показан на рис. 5.

При юстировке использовались линейные и угловые подвижки фирмы Standa 3 (рис. 5) с заявленным линейным отклонением шага 10 мкм и угловой чувствительностью 8". При этом во время юстировки удалось добиться уровня оптических потерь в 1 дБ, что соответствует линейному смещению от оптической оси в 1 мкм. После полимеризации клея позиции 1, 2, 3 (рис. 5) представляют собой единую сборку — оптический полюс. Клей в процессе затвердевания незначительно меняет свой показатель преломления, что сказывается на значении оптических потерь в пределах погрешности. На рис. 6 показан ОП, отъюстированный и собранный (метод сборки и юстировки по входящему оптическому пучку).

На данный момент исследуемым методом сделано 9 ОП.

На рис. 7 показан оптический канал, состоящий из ОП, созданных методом прямой юстировки по оптическому пучку. Потери при передаче в оптическом канале, состоящем из ОП, выполненных по методу прямой юстировки, равны 1–1,2 дБ на расстояниях от 5 до 100 мм.

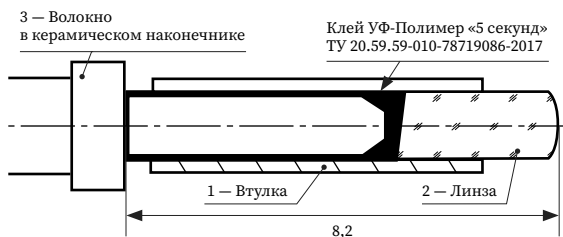
Рис. 6

ОП, сделанный методом прямой юстировки по оптическому пучку

Fig. 6

Optical pole made by direct alignment along the optical beam

Чертеж / Drawing



Сделанный ОП / Made optical pole

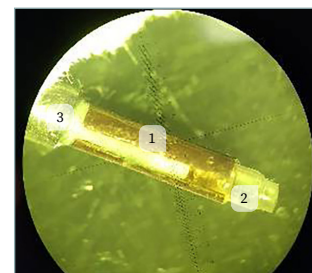


Рис. 7 ➔

ОП, сделанный методом прямой юстировки по оптическому пучку

Fig. 7

Optical pole made by direct alignment along the optical beam



3 Результаты и обсуждение

В результате исследования метода сборки и юстировки компонентов ОП каналов оптоволоконной связи создано 9 ОП, из которых можно составить канал оптической связи без подбора пар. Благодаря исследуемому методу сборки из конструкции исключены механические элементы, а юстировка компонентов ОП выполняется в процессе сборки. В среднем на изготовление одного ОП уходит 1 час 30 минут, поэтому подобный вид сборки не относится к массовому.

Следует отметить, что исследования по юстировке ОП проводились в [9, 10], однако в работе [9] авторы добились потерь уровня 3 дБ в оптическом канале, что значительно ниже, чем это удалось сделать по методу, исследованному в данной работе (1,2 дБ). В работе [10] авторы не измеряли оптические потери при юстировке, критерием выступала коллимированность профиля пучка (*англ. well-collimated beam profile*), по этой причине нельзя установить, насколько точность юстировки компонентов ОП в указанном исследовании соответствует точности юстировки, произведенной методом, рассмотренным в данной статье. Следует также отметить, что в работе [9] не подразумевалась конечная сборка такого изделия, как ОП, а проводилась только юстировка волокна относительно коллиматорного устройства.

4 Выводы

В данной статье исследован метод сборки ОП, применяемых в каналах оптической связи. Исследуемый метод позволяет производить юстировку элементов ОП в процессе его сборки. В результате из состава собираемых ОП исключаются точные механические элементы, а каналы оптической связи имеют стабильные оптические потери при передаче от 1 до 1,2 дБ на длинах от 5 до 100 мм без подбора пар.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Cen J., Ma Y., Chang H., et al. Research on fiber transceiver collimator based on optical fiber bundles // AOPC 2019: Advanced Laser Materials and Laser Technology (December 18, 2019). Beijing, China, 2019. Vol. 11333. P. 1–6. DOI:10.1117/12.2547707.
2. Denisov V.I., Ivanenko A.V., Nyushkov B.N., et al. Femtosecond fibre laser with a hybrid linear-ring cavity // Quantum Electron. 2008. Vol. 38. No. 9. P. 801–802. DOI:10.1070/QE2008v038n09ABEH013924.
3. Jiang J., Zhou X., Liu J., et al. Optical Fiber Bundle-Based High-Speed and Precise Micro-Scanning for Image High-Resolution Reconstruction // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 1. 127. DOI:10.3390/s22010127.

4. Вострикова Е.В., Литвинова Е.В., Волковский С.А. и др. Применение радиофотоники в волоконно-оптических измерительных приборах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 20. № 1. С. 1–23. DOI:10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23.
5. Zhang W., Chen F., Ma W., et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a fringe visibility enhanced fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor // Optics Express. 2018. Vol. 26. No. 6. P. 11025–11033. DOI:10.1364/OE.26.011025.
6. Chou C., Chen R., Tsai H., et al. Optimization of Coupling Efficiency of Fiber Optic Rotary Joint by Ray Tracing // Proceedings of the 8th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology PHOTOPTICS. Valletta, Malta, 2020. Vol. 1. P. 71–75. DOI:10.5220/0008895200710075.
7. Park H., Mavadia-Shukla J., Yuan W., et al. Broadband rotary joint for high-speed ultrahigh-resolution endoscopic OCT imaging at 800 nm // Optics Letters. 2017. Vol. 42. No. 23. P. 4978–4981. DOI:10.1364/OL.42.004978.
8. Xiong Z., Ai Y., Xin S., et al. Coupling efficiency and compensation analysis of optical fiber for space optical communication // Infrared and Laser Engineering. 2013. Vol. 42. No. 9. P. 2510–2514.
9. Ke X., Yin B. Experimental Research on Automatic Alignment and Control Algorithm of Spatial Light-Fiber Coupling // International Journal of Optics. 2021. Vol. 9. P. 1–9. DOI:10.1155/2021/8481146.
10. Carter J.J., Böhme S., Weber K., et al. Quasi Monolithic Fiber Collimators // arXiv:2408.06090v1 [physics.optics]. 2024. P. 1–10. DOI:10.48550/arXiv.2408.06090.

АВТОР Осипов Егор Васильевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

Поступила 18.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



Study of the assembly and alignment method of optical pole components of fiber optic communication channels

Egor V. Osipov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 egorosipov3440@gmail.com

CITATION Osipov EV. Study of the assembly and alignment method of optical pole components of fiber optic communication channels. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 139–147. DOI:10.30533/GiA-2025-018.

KEYWORDS optical fiber channel, optical pole, collimating device, optical losses in the communication channel

ABSTRACT Assembly of optical fiber pigtail with collimated lens assembly are the main elements of optical connections used in modern fiber-optic transmission devices. The efficiency and stability signal transmission depend on the adjustment accuracy of its parts. It is transmitting or receiving elements of the optical signal, providing minimal optical losses, which is important for reliable signal transmission over long distances. The article investigates the method of assembling and adjusting individual components of assembly optical fiber pigtail with collimated lens used in fiber-optic communication. The characteristics of the assembly fiber pigtail with collimated lens components that affect the optical loss of the signal during its transmission through the optical channel are analyzed. The required accuracy of the mutual connection of the assembly fiber pigtail with collimated lens components is calculated. A description of the developed stand and optical-mechanical prefabricated elements is given, which were developed to achieve acceptable accuracy of the mutual component of the assembly fiber pigtail with collimated lens components by the limiting method. Experimental testing of the research method is carried out. The results are obtained in the form of an assembled and adjusted optical optical fiber pigtail with collimated lens, which has a number of advantages over analogues. The optical channel connection is shown, which constitutes from two fiber pigtails assemblies, recorded by the method. The main characteristics of the shown optical channel are measured. The results of the study allow to create an assembly optical fiber pigtails with collimated and to apply mechanical elements with high processing accuracy in the pole structures.

REFERENCES 1. Cen J, Ma Y, Chang H, et al. Research on fiber transceiver collimator based on optical fiber bundles. *AOPC 2019: Advanced Laser Materials and Laser Technology (December 18, 2019)*. Beijing, China, 2019;11333: 1–6. DOI:10.1117/12.2547707.

2. Denisov VI, Ivanenko AV, Nyushkov BN, et al. Femtosecond fibre laser with a hybrid linear-ring cavity. *Quantum Electron.* 2008;38(9): 801–802. DOI:10.1070/QE2008v038n09ABEH013924.
3. Jiang J, Zhou X, Liu J, et al. Optical Fiber Bundle-Based High-Speed and Precise Micro-Scanning for Image High-Resolution Reconstruction. *Sensors.* 2022;22(1): 127. DOI:10.3390/s22010127.
4. Vostrikova EV, Litvinova EV, Volkovskij SA, et al. Primenenie radiofotoniki v volokonno-opticheskikh izmeritel'nyh priborah [Application of microwave photonics in fiber optical sensors]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2019;20(1): 1–23. DOI:10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23.
5. Zhang W, Chen F, Ma W, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a fringe visibility enhanced fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor. *Optics Express.* 2018;26(6): 11025–11033. DOI:10.1364/OE.26.011025.
6. Chou C, Chen R, Tsai H, et al. Optimization of Coupling Efficiency of Fiber Optic Rotary Joint by Ray Tracing. *Proceedings of the 8th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology PHOTOPTICS.* Valletta, Malta, 2020;1: 71–75. DOI:10.5220/0008895200710075.
7. Park H, Mavadia-Shukla J, Yuan W, et al. Broadband rotary joint for high-speed ultrahigh-resolution endoscopic OCT imaging at 800 nm. *Optics Letters.* 2017;42(23): 4978–4981. DOI:10.1364/OL.42.004978.
8. Xiong Z, Ai Y, Xin S, et al. Coupling efficiency and compensation analysis of optical fiber for space optical communication. *Infrared and Laser Engineering.* 2013;42(9): 2510–2514.
9. Ke X, Yin B. Experimental Research on Automatic Alignment and Control Algorithm of Spatial Light-Fiber Coupling. *International Journal of Optics.* 2021;9: 1–9. DOI:10.1155/2021/8481146.
10. Carter JJ, Böhme S, Weber K, et al. Quasi Monolithic Fiber Collimators. *arXiv:2408.06090v1 [physics.optics].* 2024: 1–10. DOI:10.48550/arXiv.2408.06090.

AUTHOR Egor V. Osipov

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

Submitted: November 18, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.