https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5

ВЕСТНИК СГУГиТ

(Сибирского государственного университета геосистем и технологий)

Научный журнал

Том 31, № 5

2026

VESTNIK SSUGT

(Siberian State University of Geosystems and Technologies)

Scientific journal

Volume 31(5)

2026

Учредитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ)

Вестник СГУГиТ

Рецензируемый научный журнал «Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)» основан в 1996 г. в целях активизации научно-исследовательской и инновационной деятельности университета, усиления интеграции вузовской науки с академической.

Журнал «Вестник СГУГиТ» предназначен для публикации оригинальных теоретических и научно-практических результатов исследований, изложенных на русском и английском языках

Разделы журнала

– Геодезия и маркшейдерия
– Дистанционное зондирование Земли, фотограмметрия
– Картография и геоинформатика
– Землеустройство, кадастр и мониторинг земель
– Оптико-электронные приборы и комплексы
– Метрология и метрологическое обеспечение
– Методология научной и образовательной деятельности

ISSN	2411-1759 (Print) 3033-7933 (Online)
Наименование органа зарегистрировавшего издание	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций – свидетельство ПИ № ФС 77-62654 от 10 августа 2015 г.
Периодичность	6 раз в год
О журнале	Научный журнал издается с 1996 г. До 2015 г. журнал выходил под названием «Вестник СГГА». С 2017 г. нумерация журнала включает номер тома (порядковый номер года издания) и номер выпуска в текущем году. Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и актуальную версию «Белого списка».
Типография	Издательско-полиграфический центр СГУГиТ, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.
Адрес редакции и издателя	630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.
Сайт	https://vestnik.sgugit.ru/
Контактные данные	E-mail: vestnik@ssga.ru Тел. (383)343-12-55
Распространение	Свободная цена.

Дата выхода в свет 29.10.2026. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 21,73. Тираж 100 экз. Заказ 204.

© СГУГиТ, 2026

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Обиденко Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Лисицкий Дмитрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Уставич Георгий Афанасьевич – д-р техн. наук, профессор, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Айрапетян Валерик Сергеевич – д-р техн. наук, доцент, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Богданова Ольга Викторовна – д-р эконом. наук, доцент, ТИУ, г. Тюмень, Российская Федерация.

Брынь Михаил Ярославович – д-р техн. наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Долгополов Даниил Валентинович – д-р техн. наук, НИИ Транснефть, г. Москва, Российская Федерация.

Комиссаров Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Мазурова Елена Михайловна – д-р техн. наук, профессор, ППК «Роскадастр», г. Новосибирск, Российская Федерация.

Мустафин Мурат Газизович – д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Радченко Андрей Васильевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, Российская Федерация.

Радченко Людмила Константиновна – канд. техн. наук, доцент, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Романовский Олег Анатольевич – д-р физ.-мат. наук, ИОА СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Сизов Александр Павлович – д-р техн. наук, профессор, МИИГАиК, г. Москва, Российская Федерация.

Степанов Юрий Александрович – д-р техн. наук, доцент, КемГУ, г. Кемерово, Российская Федерация.

Тикунов Владимир Сергеевич – д-р геогр. наук, профессор, МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация.

Тимофеев Владимир Юрьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Толстиков Александр Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, ФГУП «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии», г. Новосибирск, Российская Федерация.

Торшина Ирина Павловна – д-р техн. наук, доцент, МИИГАиК, г. Москва, Российская Федерация.

Трубина Людмила Константиновна – д-р техн. наук, профессор, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Хацевич Татьяна Николаевна – канд. техн. наук, профессор, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Хорошилов Валерий Степанович – д-р техн. наук, доцент, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Черных Елена Германовна – д-р техн. наук, доцент, ТИУ, г. Тюмень, Российская Федерация.

Шаповалов Дмитрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, ГУЗ, г. Москва, Российская Федерация.

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

Технический редактор журнала: Рыжова Виктория Андреевна.

Перевод на английский язык: Мусихин Игорь Александрович.

Редактор: Георгиевская Ольга Владимировна.

Компьютерная верстка: Рыжова Виктория Андреевна.

Дизайн обложки: Лесных Яна Анатольевна.

Founder Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
"Siberian State University of Geosystems
and Technologies"

Vestnik of SSUGT

The peer-reviewed scientific journal “Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)” was established in 1996 to advance the university's research and innovation activities and to enhance integration between university and academic science.
The "Vestnik SSUGT" is intended for publishing original theoretical and applied research findings, presented in Russian or English.

Sections of the journal

- Geodesy and Mining Surveying
- Remote Sensing of the Earth and Photogrammetry
- Cartography and Geoinformatics
- Land Management, Cadastre and Land Monitoring
- Optoelectronic devices and Complexes
- Metrology and Metrological Support
- Methodology of Research and Educational Activities

ISSN	2411-1759 (Print) 3033-7933 (Online)
Registering Authority	The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media – certificate PI No. FS 77-62654 dated August 10, 2015
Frequency	6 issues per year
About journal	The journal has been published since 1996. Prior to 2015, it was issued under the title «Vestnik SSGA». Since 2017, the journal's numbering includes the volume number (sequential year of publication) and the issue number within the current year. The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications of the Supreme State Commission for Academic Degrees and Titles (VAK). The journal is indexed in the Russian Index of Scientific Citation (RSCI) and the current version of the White List.
Printing house	SSUGT Publishing and Printing Center 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108
Editors office and publisher address	10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108
Website	https://vestnik.sgugit.ru/
Contact details	E-mail: vestnik@ssga.ru Phone: +7(383)343-12-55
Distribution Terms	Offered at a free-market price

Issue data 29.10.2026. Format 60 × 84 1/8.
Conv. pr. sheets 21,73. Circulation 100 copies. Order 204.

© SSUGT, 2026

CHIEF EDITOR

Obidenko Vladimir Ivanovich – PhD, Associate Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

DEPUTY EDITORS-IN-CHIEF:

Lisickij Dmitrij Vital'evich – DSc, Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Ustavich Georgij Afanas'evich – DSc, Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

EDITORIAL BOARD:

Ajrapetjan Valerik Sergeevich – DSc, Associate Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Bogdanova Olga Viktorovna – DSc, Associate Professor, TIU, Tyumen, Russian Federation.

Bryn Mikhail Yaroslavovich – DSc, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation.

Dolgopolov Daniil Valentinovich – DSc, Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation.

Komissarov Aleksandr Vladimirovich – DSc, Associate Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Mazurova Elena Mihajlovna– DSc, Professor, PLC "Roskadastr", Novosibirsk, Russian Federation.

Mustafin Murat Gazizovich – DSc, Associate Professor, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation.

Radchenko Andrey Vasilyevich – DSc, Professor, ISPMS SB RAS, Tomsk, Russian Federation.

Radchenko Lyudmila Konstantinovna – PhD, Associate Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Romanovskij Oleg Anatol'evich– DSc, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation.

Sizov Aleksandr Pavlovich – DSc, Professor, MIIGAiK, Moscow, Russian Federation.

Stepanov Yuri Aleksandrovich – DSc, Associate Professor, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation.

Tikunov Vladimir Sergeevich – DSc, Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Timofeev Vladimir Jur'evich – DSc, Professor, IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation.

Tolstikov Aleksandr Sergeevich – DSc, Professor, SibNIM, Novosibirsk, Russian Federation.

Torshina Irina Pavlovna – DSc, Sciences, Associate Professor, MIIGAiK, Moscow, Russian Federation.

Trubina Ljudmila Konstantinovna – DSc, Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Khatsevich Tatyana Nikolaevna – PhD., Professor, SSUGiT, Novosibirsk, Russian Federation.

Horoshilov Valerij Stepanovich – DSc, Associate Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Chernykh Elena Germanovna – DSc, Sciences, Associate Professor, TiU, Tyumen, Russian Federation.

Shapovalov Dmitrij Anatol'evich – DSc, Professor, State University of Land Management, Moscow, Russian Federation.

EDITORIAL STAFF:

Technical editor: Ryzhova Victoria Andreevna.

English language translation: Musikhin Igor Aleksandrovich.

Editor: Georgievskaia Olga Vladimirovna.

Computer Layout: Ryzhova Victoria Andreevna.

Cover Design: Lesnykh Iana Anatolyevna.

Том 31, № 5, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

Кайгородова Е. В., Тутанова М. С., Немова Н. А. Применение БАС в геодезическом мониторинге устойчивости бортов Качарского карьера 8

Канушин В. Ф., Голдобин Д. Н., Кобелева Н. Н. Разложение приливного потенциала по сферическим гармоникам до пятой степени 21

Куприянов А. О., Морозов Д. А., Мелихова Д. С., Молоков П. В. Методика оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи наземного лазерного сканера 34

Сальников В. Г., Астапов А. М., Горобцов С. Р., Геращенко Г. Д. Оценка возможности использования смартфонов в качестве геодезического оборудования для определения геометрических параметров строительных конструкций 45

Хушт Н. И., Брынь М. Я. Методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации 53

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

Лоссов К. К., Малинников В. А. Статистический анализ влияния скорости ветра на возникновение прибрежного апвеллинга в море Лаптевых по материалам космических съемок 64

Хлебникова Т. А., Опритова О. А., Гулиев А. Ш. Автоматическая идентификации объектов недвижимости с использованием спутниковых данных и отечественного программного обеспечения 74

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Лебзак А. О., Лебзак Е. В., Янкелевич С. С. От карты к когнитивной модели: эволюция геопространственных представлений в эпоху цифровых двойников 81

Нгуен Д. К. О выборе территориальных единиц картографирования для моделирования экологической обстановки города (на примере Ханоя) 92

Данг Хиен Фам, Братков В. В. Оценка изменения и трансформации водных и околоводных объектов города Хайфон на основе разновременных космических изображений Landsat 101

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

Байорис А. Р., Ершов А. В. Мониторинг деформаций объектов городской инфраструктуры Москвы с применением лазерного сканирования и 3D-моделирования 112

Казиев В. М., Махотлова М. Ш. Эрозия почв в Российской Федерации: анализ процессов, моделирование и стратегии устойчивого землепользования 122

Карташова К. П., Дубровский А. В., Кубраков Д. В., Татаренко В. И. О проектах рекультивации как составляющей государственного фонда данных землеустройства 134

Кустышева И. Н., Никулина А. В. Разработка модели корректировки кадастровой стоимости объектов недвижимости повышенной комфортности (на примере пентхаусов г. Москвы) 146

Панютищева А. А., Шевченко Г. Г. Разработка рекомендаций по внедрению кадастровой информационной модели 158

Подрядчикова Е. Д., Раева И. В., Киселев Н. В. Реализация методики выявления неиспользуемых земельных участков в среде Q-GIS 169

Харазян А. А. Технологические аспекты интеграции информационной модели объекта недвижимости в структуру данных ЕГРН 179

Volume 31(5), 2026

CONTENTS

GEODESY AND MINING SURVEYING

Kaygorodova Y. V., Tutanova M. S., Nemova N. A. UAS-based geodetic monitoring of slope stability at the Kachar open-pit mine 8

Kanushin V. F., Goldobin D. N., Kobeleva N. N. Decomposition of the tidal potential up to the 5th degree using spherical harmonics 21

Kupriyanov A. O., Morozov D. A., Melikhova D. S., Molokov P. V. Methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning of highly detailed surfaces 34

Salnikov V. G., Astapov A. M., Gorobtsov S. R., Gerashenko G. D. Evaluating the feasibility of smartphone-based geodetic surveying for determining geometric parameters of building structures 45

Khusht N. I., Bryn M. Ya. An integrated voxelization-segmentation framework for adaptive thinning of airborne LiDAR point clouds 53

REMOTE SENSING OF THE EARTH AND PHOTOGRAMMETRY

Lossov K. K., Malinnikov V. A. Wind velocity as a primary predictor of Laptev Sea upwelling: a remote sensing assessment 64

Khlebnikova T. A., Opritova O. A., Guliyev A. Sh. A framework for automated real estate object detection using high-resolution satellite imagery and indigenous GIS software 74

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

Lebzak A. O., Lebzak E. V., Yankelevich S. S. From cartographic representation to cognitive modeling: the evolution of geospatial paradigms in the age of digital twins 81

Nguyen D. Q. On the selection of mapping units for modelling urban environmental conditions (case study of Hanoi) 92

Dang Hien Pham, Bratkov V. V. Assessing changes and transformation of aquatic and near-shore features in Hai Phong City using multi-temporal Landsat satellite imagery 101

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

Bayoris A. R., Ershov A. V. Deformation monitoring of Moscow's urban infrastructure using terrestrial laser scanning and 3D modeling 112

Kaziev V. M., Makhotlova M. Sh. A deterministic modeling framework for assessing soil erosion dynamics in the Russian Federation: implications for sustainable land management 122

Kartashova K. P., Dubrovsky A. V., Kubrakov D. V., Tatarenko V. I. On the system of regional specially protected natural areas of Russia 134

Kustysheva I. N., Nikulina A. V. Refining cadastral valuation models for luxury residential assets: a case study on Moscow penthouses 146

Panyutischeva A. A., Shevchenko G. G. Developing recommendations for the implementation of a cadastral information model 158

Podryadchikova E. D., Raeva I. V., Kiselyov N. V. A QGIS-based framework for automat-ed identification of unused land plots 169

Kharazyan A. A. Technological aspects of integrating a cadastral information model into the Unified State Register of Real Estate data structure 179

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

Научно-практическая статья/ Research article
УДК 528.48:623.746-519
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-8-20

Применение БАС в геодезическом мониторинге устойчивости бортов Качарского карьера

Е. В. Кайгородова[1,2]✉, М. С. Тутанова[1,2], Н. А. Немова[1,3]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан
[3] Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: yevgeniya_kaygorodova@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения беспилотных авиационных систем в задачах геодезического мониторинга устойчивости бортов глубоких карьеров. Цель работы заключалась в оценке эффективности и достоверности аэрофотосъемки с БАС DJI Mavic 3 Enterprise при контроле деформационных процессов на северном борту Качарского карьера путем сопоставления результатов фотограмметрической обработки с данными классических инструментальных наблюдений. В рамках исследования выполнены тахеометрические и ГНСС-измерения на наблюдательной станции DEF, аэрофотосъемка исследуемого участка, построение ортофотопланов и цифровых моделей местности, а также количественное сравнение координат реперов и векторов смещений, определенных двумя независимыми методами. Установлено, что средние квадратические ошибки определения координат реперов по данным фотограмметрической обработки составляют до 3,8 см в плане и до 4,2 см по высоте. Показано, что результаты фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БАС согласуются с данными тахеометрических и ГНСС-измерений по характеру распределения смещений рабочих реперов. При этом ортофотопланы и цифровые модели местности позволяют дополнительно анализировать морфологические изменения поверхности борта на участках между рабочими реперами, что повышает пространственную информативность геодезического мониторинга. Сделан вывод о целесообразности комплексного применения аэрофотосъемки с БАС и классических маркшейдерско-геодезических наблюдений в системе геодезического мониторинга глубоких карьеров.

Ключевые слова: техногенный объект, геодезический мониторинг, дистанционные методы, БАС, аэрофотосъемка, ортофотоплан, цифровая модель местности

Для цитирования:
Кайгородова Е. В., Тутанова М. С., Немова Н. А. Применение БАС в геодезическом мониторинге устойчивости бортов Качарского карьера. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 8–20. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-8-20

© Е. В. Кайгородова, М. С. Тутанова, Н. А. Немова, 2026

UAS-based geodetic monitoring of slope stability at the Kachar open-pit mine

Y. V. Kaygorodova[1,2]✉, *M. S. Tutanova*[1,2], *N. A. Nemova*[1,3]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan
[3] N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: yevgeniya_kaygorodova@mail.ru

Abstract. The study investigates the application of unmanned aerial systems (UAS) for geodetic monitoring of slope stability in deep open-pit mines. Its primary objective is to assess the accuracy and reliability of aerial photogrammetry using the DJI Mavic 3 Enterprise UAS for monitoring deformation processes on the northern slope of the Kachar open-pit mine through comparison with conventional instrumental surveying methods. The research methodology encompassed total station and GNSS measurements at the DEF monitoring station, aerial photography of the study area, generation of orthophotoplans and digital terrain models, and quantitative comparison of benchmark coordinates and displacement vectors derived from both independent methods. The obtained results demonstrate that root mean square errors for benchmark coordinate determination using aerial photogrammetry do not exceed 3.8 cm in planimetry and 4.2 cm in height. The photogrammetric approach successfully reproduces the spatial distribution of deformation activity identified through conventional monitoring while providing continuous spatial coverage of inter-benchmark areas. The findings support the integration of UAS-based photogrammetry with traditional mine surveying and geodetic observations as a complementary component of comprehensive geomechanical monitoring systems for deep open-pit mining operations.

Keywords: technogenic object, geodetic monitoring, remote sensing methods, UAS, aerial photogrammetry, orthophotoplan, digital terrain model

For citation:
Kaygorodova Y. V., Tutanova M. S., Nemova N. A. (2026). UAS-based geodetic monitoring of slope stability at the Kachar open-pit mine. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 8–20. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-8-20

Введение

Обеспечение устойчивости бортов карьеров при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом относится к числу ключевых условий безопасного ведения горных работ. Увеличение глубины карьеров, усложнение инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также интенсификация горных работ обусловливают рост геомеханических рисков, связанных с развитием деформационных процессов в прибортовых массивах. Потеря устойчивости уступов и бортов карьера может приводить к оползням, обрушениям и деформациям, нарушающим технологический цикл предприятия и создающим угрозу для персонала, оборудования и транспортной инфраструктуры [1, 2]. В связи с этим геодезический мониторинг приобретает не только производственное, но и важное научно-практическое значение.

Качарское месторождение магнетитовых руд, разрабатываемое АО «Качары руда», характеризуется сложным сочетанием инженерно-геологических факторов, предопределяющих высокую вероятность развития деформаций прибортовых массивов. К числу таких факторов относятся значительная мощность рыхлых обводненных отложений, ослабленные глинистые горизонты, тектоническая нарушенность пород и техногенное обводнение массива. Рыхлые водонасыщенные отложения отличаются

пониженной прочностью и повышенной деформируемостью, что способствует развитию осадок и локальных смещений в верхней части борта. Ослабленные глинистые горизонты могут выполнять роль поверхностей скольжения, по которым происходит сдвиг отдельных блоков массива. Тектонические нарушения и зоны трещиноватости снижают связанность пород и формируют направления преимущественного развития деформаций. Техногенное обводнение, обусловленное изменением естественного гидрогеологического режима в процессе горных работ, приводит к росту влажности пород и снижению их прочностных характеристик.

При глубине карьера, достигающей 455 м, совокупное влияние указанных факторов повышает вероятность активизации оползневых и сдвиговых процессов, особенно в верхней части борта, сложенной менее устойчивыми породами. В связи с этим для рассматриваемого участка требуется применение геодезического мониторинга, обеспечивающего как высокоточное определение смещений в закрепленных точках наблюдений, так и получение площадной информации о состоянии поверхности борта [3].

На Качарском карьере геодезический контроль деформаций прибортового массива традиционно выполняется по системе наблюдательных станций, включающих профильные линии и закрепленные реперы. Определение пространственного положения рабочих реперов осуществляется с применением электронных тахеометров и спутниковой геодезической аппаратуры ГНСС, что позволяет получать количественные характеристики горизонтальных и вертикальных смещений борта карьера [1, 4]. Данные методы обеспечивают надежное определение смещений в фиксированных точках наблюдений, однако их существенным ограничением является дискретный характер получаемой информации. Вследствие этого участки массива, расположенные между рабочими реперами, остаются вне непосредственного инструментального контроля, что может затруднять выявление деформационных зон на раннем этапе их развития.

В современных условиях для повышения пространственной полноты геодезического мониторинга деформаций карьерных бортов все чаще используются материалы аэрофотосъемки, полученные с применением беспилотных авиационных систем [5]. Применение БАС позволяет формировать детализированные ортофотопланы и цифровые модели местности, обеспечивающие непрерывное пространственное описание состояния борта карьера [6]. Это существенно расширяет возможности мониторинга по сравнению с традиционными точечными наблюдениями, особенно в условиях сложного рельефа, ограниченной доступности отдельных участков и необходимости оперативного получения данных. Вместе с тем вопрос о точности, достоверности и пределах применимости фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БАС в условиях активных деформационных процессов требует дополнительной экспериментальной оценки на основе сопоставления с результатами инструментальных измерений [7].

В этой связи целью настоящей статьи является оценка эффективности и достоверности применения аэрофотосъемки с БАС DJI Mavic 3 Enterprise для мониторинга устойчивости прибортовых массивов Качарского карьера путем сопоставления результатов, полученных по данным фотограмметрической обработки, с данными классических инструментальных наблюдений. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1) проведение цикла высокоточных инструментальных измерений на наблюдательных станциях карьера;

2) выполнение аэрофотосъемки исследуемого участка с последующей фотограмметрической обработкой материалов;

3) количественное сравнение координат реперов и векторов смещений, полученных двумя независимыми методами;

4) оценка информативности предлагаемого подхода для выявления деформаций в пространстве;

5) обоснование рекомендаций по комплексному применению классических и дистанционных методов мониторинга.

Практическая значимость работы заключается в обосновании комплексной схемы мониторинга, сочетающей классические высокоточные измерения и аэрофотосъемку с БАС для повышения полноты контроля деформационных процессов на глубоких карьерах [2, 3, 6].

Методы и материалы

Объектом исследования является северный борт Качарского карьера по добыче железных руд, входящего в состав Качарского месторождения АО «Качары руда», расположенного в Костанайской области Республики Казахстан, в 45 км к северо-западу от г. Рудного. Месторождение характеризуется сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, определяющими высокую вероятность развития деформационных процессов в прибортовых массивах. В геологическом строении участка зайдействованы два резко различающихся комплекса пород: палеозойский вулканогенно-осадочный фундамент и перекрывающие его рыхлые мезо-кайнозойские отложения мощностью от 130 до 200 м. Существенное влияние на устойчивость бортов оказывают слабые глинистые горизонты, наличие трещиноватых зон, тектонических нарушений и техногенное обводнение массива. На момент проведения исследований глубина карьера достигала 455 м.

Для контроля состояния устойчивости бортов на Качарском карьере создана сеть наблюдательных станций, включающая 7 станций и 11 профильных линий (рис. 1, *а*). В качестве ключевого участка для сравнительного анализа методов мониторинга была выбрана наблюдательная станция DEF, расположенная на северном борту карьера (гор. +196 м/+170 м) (рис. 1, *б*), где ранее были зафиксированы наиболее интенсивные смещения прибортового массива. Станция состоит из двух профильных линий (DEF-A и DEF-B), 3 опорных и 12 рабочих реперов.

За период с 16.06.2025 по 12.08.2025 на данном участке обнаружено смещение реперов в сторону выработанного пространства. По профильной линии DEF-A максимальное горизонтальное смещение составило 3 869,0 мм (гор. +189 м), максимальное вертикальное смещение –2 638 мм (гор. +189 м), среднесуточная скорость 83,6 мм/сут. Наличие выраженных горизонтальных и вертикальных смещений, а также их высокая интенсивность позволили рассматривать наблюдательную станцию DEF как репрезентативный участок для оценки возможностей применения материалов аэрофотосъемки с БАС при геодезическом мониторинге деформаций бортов карьера [1, 5, 8].

В качестве контрольных данных для сопоставления с результатами фотограмметрической обработки использованы материалы тахеометрических и ГНСС-измерений, выполняемых на Качарском карьере в составе действующей системы геодезического контроля деформаций бортов. Наблюдения организованы по профильным линиям, ориентированным преимущественно перпендикулярно простиранию борта [1, 9]. Геодезическая сеть наблюдений включает опорные и рабочие реперы. Опорные реперы располагаются за пределами зоны возможных деформаций и обеспечивают устойчивость координатной основы наблюдений. Рабочие реперы закреплены непосредственно на бермах и площадках уступов в пределах контролируемого участка борта и используются для определения горизонтальных, вертикальных и векторных смещений прибортового массива. Расстояние между реперами определяется положением относительно бровки уступа и составляет 30–60 м.

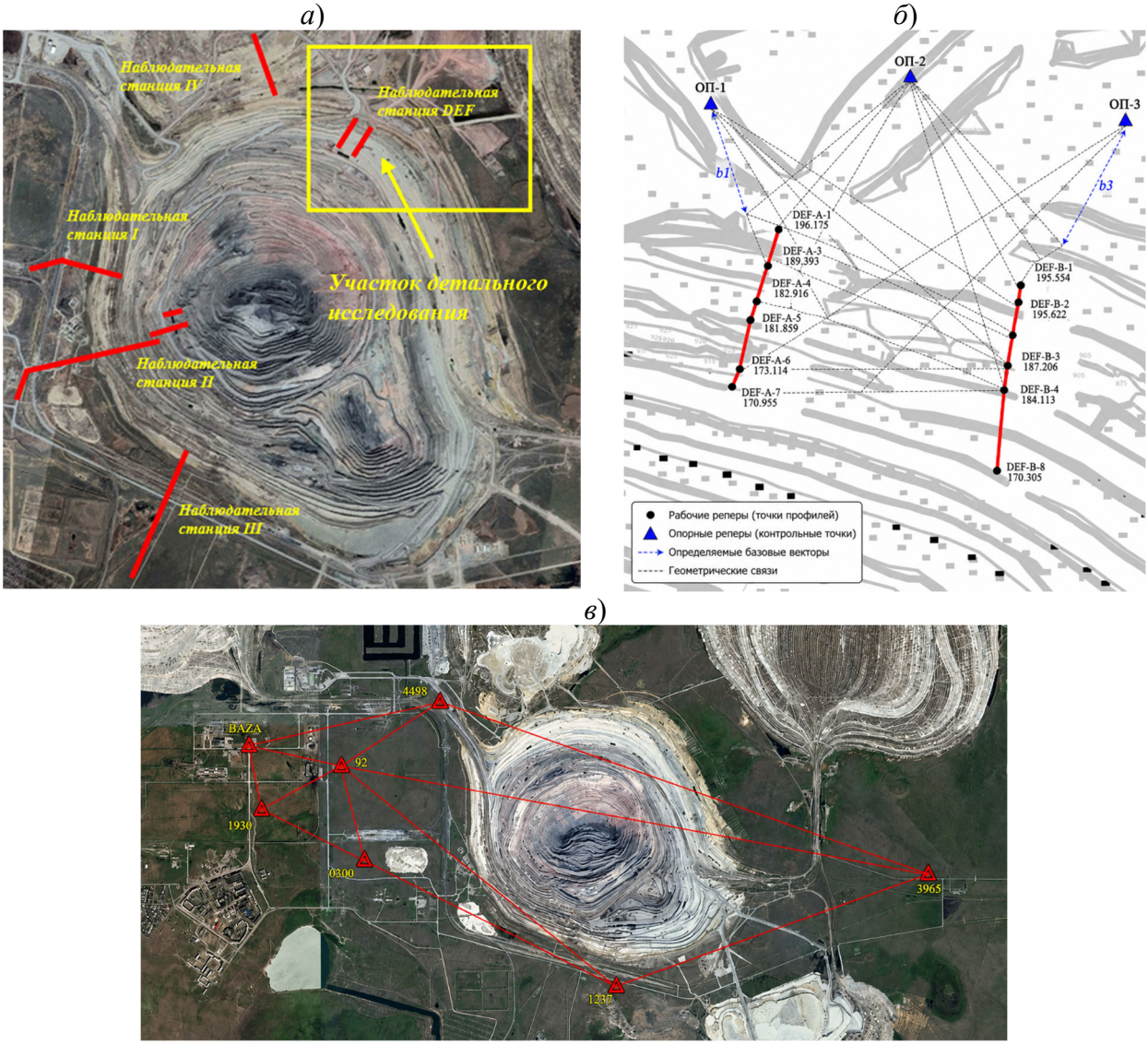


Рис. 1. Месторасположение наблюдательной станции DEF: *а*) расположение наблюдательных станций в пределах карьера; *б*) размещение опорных и рабочих реперов наблюдательной станции; *в*) местоположение пунктов ГГС

Определение координат рабочих реперов выполнялось преимущественно методом полярных координат, а в труднодоступных условиях – методом линейно-угловой засечки. Установка отражателей осуществлялась с применением приспособлений для принудительного центрирования, что обеспечивало совмещение оси отражателя с центром репера и снижало влияние ошибки центрирования на результаты измерений [9, 10]. Обработка результатов полевых измерений осуществлялась в программном обеспечении Leica Infinity. Для типовых условий наблюдений средняя квадратическая ошибка определения планового положения репера не превышала 4,1 мм, а пространственная ошибка его положения 4,9 мм.

В качестве дистанционного метода в исследовании использована аэрофотосъемка с DJI Mavic 3 Enterprise с последующей фотограмметрической обработкой материалов [11, 12]. БАС оснащен встроенным RTK-модулем и камерой с матрицей 4/3" CMOS разрешением 20 МП. Наличие механического затвора обеспечивало получение геометрически стабильных снимков без смазывания, что является важным условием фотограмметрической обработки. Съемка выполнялась в формате

DNG (RAW), позволяющем сохранить полный объем исходной радиометрической информации [13].

Для обеспечения высокой точности геодезической привязки на участке была создана сеть временных маркированных опознавательных знаков [7], представленных контрастными знаками размером 40×40 см. Марки размещались равномерно по площади съемки и вблизи реперов наблюдательной станции DEF. Координаты центров марок определялись с помощью GNSS-приемников Leica GS14 в статическом режиме с постобработкой. Продолжительность сеанса наблюдений на каждой точке составляла не менее 15 мин. Согласно техническим характеристикам Leica GS14, паспортная точность статических и быстрых статических фазовых измерений с постобработкой составляет 3 мм + 0,5 ppm в плане и 5 мм + 0,5 ppm по высоте. С учетом выбранной схемы наблюдений такие параметры обеспечивают сантиметровый уровень определения координат центров опознавательных знаков, достаточный для их использования при координатной привязке фотограмметрического блока.

Для обеспечения RTK-режима в районе работ была развернута собственная базовая GNSS-станция, установленная на пункте с известными координатами (рис. 2).

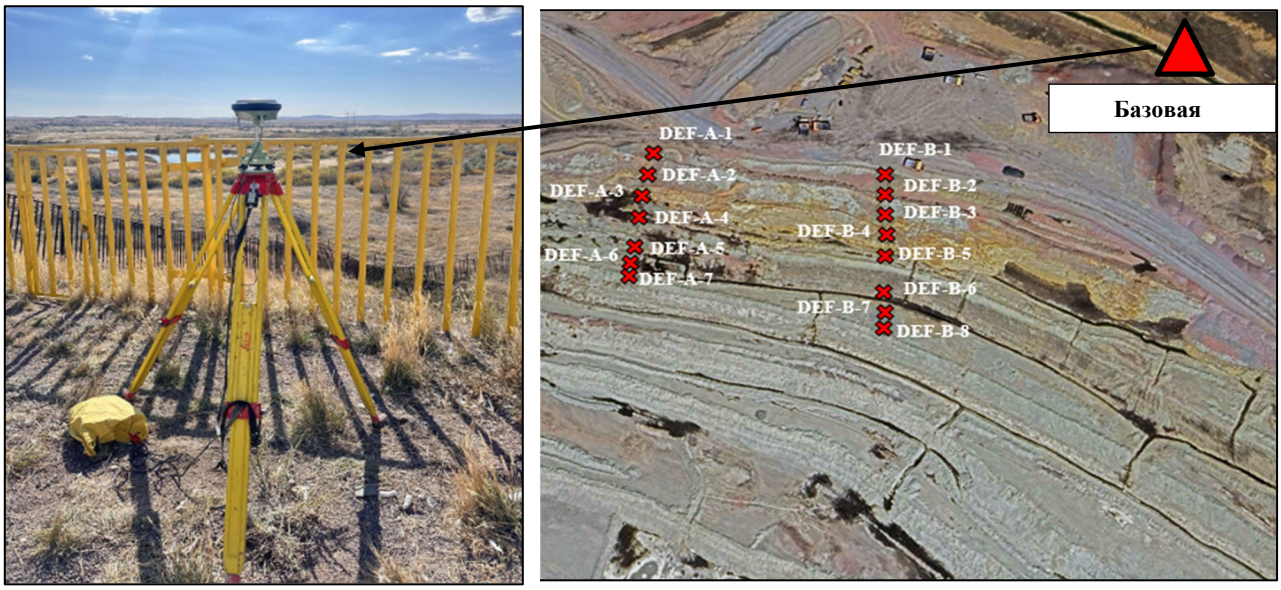


Рис. 2. Пространственное положение базовой GNSS-станции относительно наблюдательной станции DEF на северном борту Качарского карьера

Планирование полетов выполнялось в программном обеспечении DJI Pilot 2. Высота съемки составляла 120 м над точкой взлета, продольное перекрытие снимков – 80 %, поперечное – 65 %. Съемка проводилась в автоматическом режиме по сетке маршрутов при надирной ориентации камеры. Общая площадь съемки составила 0,45 км². Аэрофотосъемка выполнялась при благоприятных метеорологических условиях и равномерной освещенности участка, что обеспечило достаточную различимость опознавательных знаков, реперов и характерных элементов поверхности при последующей фотограмметрической обработке материалов [14].

Фотограмметрическая обработка материалов выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. В результате обработки формировались ортофотопланы, плотные облака точек и цифровые модели местности, приведенные к той же системе координат, что и данные классических инструментальных наблюдений. Это обеспечивало их пространственную сопоставимость [11].

Для оценки возможностей предлагаемого метода по материалам аэрофотосъемки выполнялось определение координат рабочих реперов наблюдательной станции DEF, а также построение разновременных цифровых моделей местности для последующего

анализа смещений [14]. Сопоставление результатов классического мониторинга и данных БАС проводилось по двум направлениям: по расхождениям координат реперов на фиксированную дату и по векторным характеристикам смещений за рассматриваемый интервал наблюдений [15]. На основе полученных выборок далее оценивалась точность предлагаемого подхода и степень согласованности результатов, полученных независимыми методами.

Результаты

По результатам трех серий высокоточных инструментальных наблюдений, выполненных на наблюдательной станции DEF в период с сентября 2024 г. по август 2025 г., установлено развитие интенсивных деформационных процессов на северном борту Качарского карьера. Деформационный процесс носил неравномерный характер: максимальные смещения зафиксированы в центральной части профильной линии DEF-B. На реперах DEF-B-3 и DEF-B-4 зарегистрированы векторные смещения 6 832 и 7 178 мм соответственно (рис. 3), тогда как на крайних реперах величины перемещений оставались незначительными. На отдельных участках профильной линии часть реперов была утрачена в результате развития деформаций. Результаты инструментальных наблюдений приведены в табл. 1.

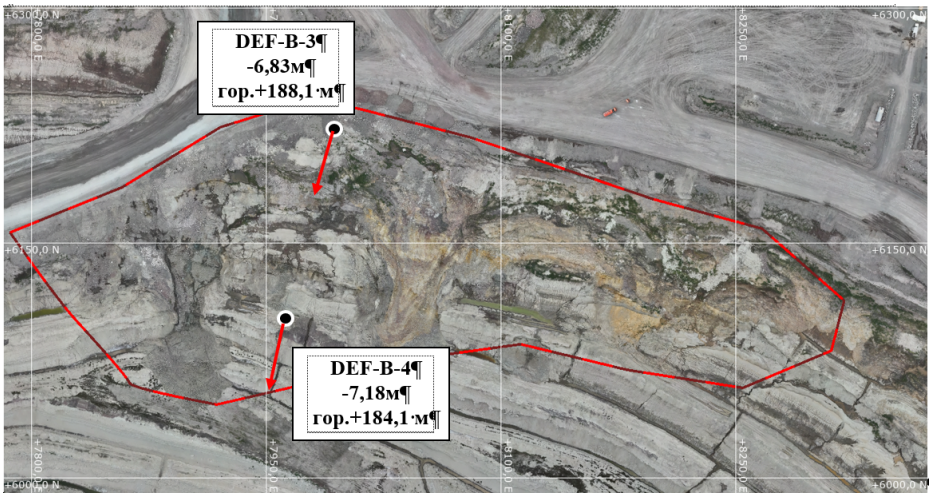


Рис. 3. Распределение векторов смещений рабочих реперов

Таблица 1. Результаты определения смещений рабочих реперов по данным инструментальных наблюдений

Номер точки	02.09.2024			13.08.2025			ΔY, мм	ΔX, мм	ΔZ, мм	S, мм
	Y, м	X, м	Z, м	Y, м	X, м	Z, м				
DEF-B-1	8208,225	6189,150	195,530	8208,223	6189,13	195,554	–2	–20	24	32
DEF-B-2	8206,698	6177,847	195,594	8206,678	6177,802	195,622	–20	–45	28	57
DEF-B-3	8199,172	6135,442	188,112	8197,305	6128,932	187,206	–1867	–6510	–907	6832
DEF-B-4	8196,801	6118,861	184,101	8194,657	6112,011	184,113	–2144	–6850	12	7178
DEF-B-8	8192,362	6065,465	170,248	8192,361	6065,445	170,305	–1	–20	57	61

Фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки позволила построить ортофотопланы и цифровые модели местности исследуемого участка северного борта карьера. На основе сопоставления разновременных цифровых моделей были выделены участки с выраженными изменениями поверхности борта, соответствующие зонам развития деформационного процесса (рис. 4). На ортофотоплане были локализованы деформационные участки № 1–4, а по результатам анализа разностных моделей определены максимальные значения оседаний в пределах наиболее активных зон. В частности, на участке профильной линии DEF-B максимальное оседание составило −7,1 м на горизонте +184 м, а профильной линии DEF-A −0,77 м на горизонте +190 м.

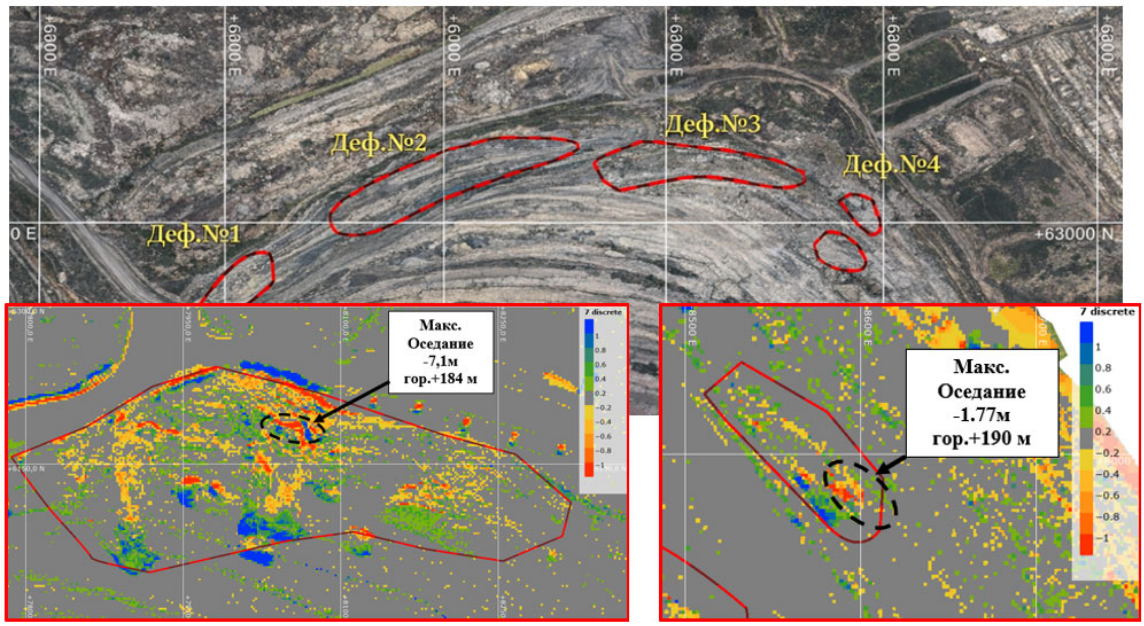


Рис. 4. Идентификация рабочих реперов наблюдательной станции DEF на ортофотоплане и цифровой модели рельефа

Дополнительно по ортофотоплану и плотному облаку точек были идентифицированы рабочие реперы наблюдательной станции DEF, для которых определялись пространственные координаты и модули смещений за рассматриваемый интервал наблюдений [13]. Плановое положение реперов устанавливалось по изображению оголовков на ортофотоплане, а высотное положение – по цифровой модели местности. Точность определения координат реперов оценивалась с учетом не только пространственного разрешения ортофотоплана, но и точности координатной привязки фотограмметрического блока по маркированным знакам, а также остаточных расхождений на контрольных точках.

Для этого координаты контрольных точек, измеренные по ортофотоплану, сопоставлялись с их координатами, полученными по результатам натурных ГНСС-измерений. По результатам такого сопоставления оценивались средние квадратические ошибки планового положения и высотных отметок, которые использовались при анализе достоверности определения смещений рабочих реперов.

Определение координат по данным аэрофотограмметрической обработки выполнено для 12 реперов профильных линий DEF-A и DEF-B по материалам съемки за апрель 2025 г., а при необходимости контроля – по данным предыдущего цикла наблюдений за июль 2024 г. Сравнение координат реперов, полученных по данным классических инструментальных измерений и аэрофотосъемки с БАС, показало, что средние квадратические ошибки определения планового положения составили до 3,8 см, а высотных отметок – до 4,2 см.

Сопоставление смещений реперов, определенных по данным классического инструментального мониторинга и фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, показало совпадение общей картины распределения деформационной активности в пределах профильной линии DEF-B. По данным фотограмметрической обработки с БАС максимальные векторные смещения также приурочены к реперам DEF-B-3 и DEF-B-4, где их величины составили 6 673 и 7 054 мм соответственно, тогда как на реперах DEF-B-1, DEF-B-2 и DEF-B-8 зарегистрированы незначительные перемещения в пределах 33–63 мм. Результаты определения смещений по данным фотограмметрической обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения смещений реперов станции DEF-B по данным фотограмметрической обработки

Номер точки	ΔY, мм	ΔX, мм	ΔZ, мм	Модуль смещения, мм
DEF-B-1	–6	–24	21	33
DEF-B-2	–24	–39	31	55
DEF-B-3	–1888	–628	–894	6 673
DEF-B-4	–2169	–6712	25	7 054
DEF-B-8	–4	–16	61	63

Таким образом, по результатам инструментальных и фотограмметрических наблюдений получены сопоставимые данные о смещениях реперов наблюдательной станции DEF. В обоих случаях максимальные деформации зафиксированы в центральной части профильной линии DEF-B, а распределение смещений по реперам имеет сходный характер. Построенные ортофотопланы и цифровые модели местности обеспечили идентификацию рабочих реперов и определение их пространственного положения, что позволило выполнить количественное сопоставление результатов, полученных различными методами наблюдений [14].

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки с БАС позволяет воспроизвести общий характер распределения смещений рабочих реперов, установленный по данным тахеометрических и ГНСС-измерений. В обоих случаях максимальные перемещения приурочены к центральной части профильной линии DEF-B, где расположены реперы DEF-B-3 и DEF-B-4. Это подтверждает возможность применения материалов аэрофотосъемки с БАС для выявления участков с наиболее выраженными признаками деформационной активности прибортового массива [1, 2].

Сопоставление результатов также показывает различие функциональных возможностей используемых методов. Тахеометрические и ГНСС-измерения обеспечивают высокоточное определение пространственного положения рабочих реперов и расчет их смещений, поэтому сохраняют приоритетное значение при контроле малых деформаций. Их ограничением является получение информации только в закрепленных точках наблюдательной станции, вследствие чего участки борта между рабочими реперами не охватываются непосредственными инструментальными измерениями [2, 3, 5].

Материалы аэрофотосъемки после фотограмметрической обработки позволяют дополнить точечные инструментальные наблюдения площадной информацией о состоянии массива. При этом следует учитывать, что ортофотопланы, плотные облака точек и цифровые модели местности также имеют дискретную природу, поскольку формируются по совокупности цифровых снимков, точек фотограмметрического построения и заданному пространственному разрешению. Поэтому преимущество данного подхода заключается не в абсолютной непрерывности наблюдений, а в более детальном пространственном представлении поверхности по сравнению с системой отдельных рабочих реперов. Это позволяет выявлять локальные морфологические

признаки деформаций, уточнять границы активных участков и анализировать состояние поверхности на интервалах между реперами.

Вместе с тем фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки с БАС уступает тахеометрическим и ГНСС-измерениям по точности определения координат отдельных точек. Надежность результатов зависит от параметров съемки, пространственного разрешения снимков, точности координатной привязки по маркированным знакам, остаточных расхождений на контрольных точках и условий идентификации рабочих реперов на ортофотоплане и в плотном облаке точек [14]. В связи с этим использование материалов аэрофотосъемки с БАС целесообразно рассматривать как дополнение к инструментальным наблюдениям, а не как их полную замену.

С учетом ранее опубликованных исследований в данной работе выполнена адаптация существующего подхода к применению материалов аэрофотосъемки с БАС для условий конкретного производственного объекта – северного борта Качарского карьера [2, 3]. Адаптация заключалась в совмещении данных тахеометрических и ГНСС-измерений с результатами фотограмметрической обработки, приведении материалов к единой системе координат, сопоставлении смещений рабочих реперов и оценке возможности использования ортофотопланов и цифровых моделей местности для уточнения пространственного положения активной зоны деформаций. Наиболее рациональной для рассматриваемого объекта является комплексная схема геодезического мониторинга, при которой тахеометрические и ГНСС-измерения обеспечивают высокоточное определение смещений рабочих реперов, а материалы аэрофотосъемки с БАС дополняют их площадной информацией о состоянии поверхности борта [1, 9].

Заключение

Проведенное исследование показало, что на северном борту Качарского карьера в пределах наблюдательной станции DEF развиваются интенсивные деформационные процессы, наиболее активно проявляющиеся в центральной части профильной линии DEF-B. Классические инструментальные наблюдения позволили получить эталонные количественные характеристики смещений, использованные для сопоставления с результатами фотограмметрической обработки данных с БАС.

Установлено, что применение БАС DJI Mavic 3 Enterprise обеспечивает построение ортофотопланов и цифровых моделей местности, пригодных для определения координат реперов и анализа смещений на деформационно-активных участках. Средние квадратические ошибки определения координат по данным фотограмметрической обработки составили до 3,8 см в плане и до 4,2 см по высоте.

Показано, что результаты фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БАС воспроизводят общий характер пространственного распределения смещений, установленный по данным тахеометрических и ГНСС-измерений, и позволяют дополнительно оценивать состояние поверхности борта на участках между рабочими реперами. Наиболее рациональной является комплексная схема наблюдений, сочетающая периодическую аэрофотосъемку с БАС, тахеометрические и ГНСС-измерения на наиболее ответственных участках [9]. Это позволяет повысить полноту и надежность геодезического мониторинга устойчивости бортов глубоких карьеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агарков И. Б., Рыльникова М. В., Никифорова И. Л. Разработка методики мониторинга деформаций уступов и бортов карьеров с применением беспилотных летательных аппаратов. Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 6 (134). С. 33–39. DOI 10.56195/20793332_2024_6_33_39. EDN NWTGNO.

2. Казанцева В. В., Косарев Н. С. Совершенствование методики геодезического мониторинга состояния земной поверхности и прибортовых массивов на основе данных беспилотных авиационных систем. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2025. Т. 69, № 6. С. 25–37. DOI 10.30533/GiA-2025-058. EDN WJLITY.

3. Казанцева В. В. Совершенствование методики мониторинга состояния земной поверхности прибортовых массивов на основе беспилотных авиационных систем. Маркшейдерский вестник. 2025. № 2 (155). С. 19–26. EDN YMDWNC.

4. Боос И. Ю., Руденко Е. А., Разин А. И. [и др.] Определение элементов залегания трещин с применением БПЛА. Московский экономический журнал. 2020. № 10. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10640.

5. Загибалов А. В., Беляев Е. Н., Рахимов Ш. Ш., Ботиров Ш. С. Автоматизация мониторинга деформации бортов карьера. Universum: технические науки. 2024. № 10 (127). DOI 10.32743/UniTech.2024.127.10.18460.

6. Косарев Н. С. О необходимости создания отечественного программного обеспечения для автоматизированного геодезического мониторинга. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 3. С. 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14.

7. Литвиненко Н. В., Маврин И. Д., Идрисов А. Ф. О выборе методики детальной съемки бортов карьеров при помощи БПЛА для оценки их трещиноватости. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2024. Т. 15, № 1. С. 12–15. EDN DHTYKB.

8. Дедкова В. В. Исследование точности формирования снимка камерами со шторно-щелевым затвором при съемке с беспилотных воздушных судов. Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 4. С. 54–60. EDN JQGXJZ.

9. Хасанов Д. Н. Методы повышения точности фотограмметрии открытых горных работ. Проблемы недропользования. 2025. № 1 (44). С. 135–146. DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.135. EDN ORCEWX.

10. Кириков Д. А., Калугина А. М., Жгилев А. П. [и др.] Применение фотограмметрии для определения коэффициента устойчивости борта карьера. Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47, № 2 (87). С. 180–189. DOI 10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189. EDN QQQSYB.

11. Atik M. E., Arkali M. Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production. Drones. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 15. DOI 10.3390/drones8010015.

12. Combining remote sensing techniques to optimize digital surface models for change detection: a case study at a pit wall in the Canadian Cordillera. Natural Hazards. 2025. Vol. 121. P. 22375–22401. DOI 10.1007/s11069-025-07688-0.

13. Yiğit A. Y., Şenol H. İ. Surface Change and Stability Analysis in Open-Pit Mines Using UAV Photogrammetric Data and Geospatial Analysis. Drones. 2025. Vol. 9, No. 7. P. 472. DOI 10.3390/drones9070472.

14. Topographic deformation and geomorphic instability of mine dump slopes: A UAV-based multi-scale analysis framework. Journal of King Saud University Science. 2026. Vol. 38, No. 2. DOI 10.1016/j.jksus.2026.103456.

15. Tangadzani J., Paradzayi C., Muromo T. Application of UAV-based Photogrammetry in Monitoring Slope Deformations in Open Pit Mining Environments: A Systematic Review. FIG Peer Review Journal. 2024. P. 12400.

REFERENCES

1. Agarkov, I. B., Rylnikova, M. V., & Nikiforova, I. L. (2024). Development of a methodology for monitoring deformations of open-pit benches and highwalls using unmanned aerial vehicles. *Markshey-deriya i nedropol'zovaniye [Mine Surveying and Subsoil Use].* No. 6(134). pp. 33–39. DOI 10.56195/20793332_2024_6_33_39. EDN NWTGNO [in Russian].

2. Kazantseva, V. V., Kosarev, N. S. (2025). Improving the methodology for geodetic imaging of the Earth's surface and "Diptych" instrument arrays using data from unmanned aerial systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"emka [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography].* Vol. 69, No. 6, pp. 25–37. DOI 10.30533/GiA-2025-058. EDN WJLITY [in Russian].

3. Kazantseva, V. V. (2025). Improving the methodology for monitoring the state of the land surface and pit-slope rock masses using unmanned aerial systems. *Marksheyderskiy Vestnik [Mine Surveyor's Bulletin].* No. 2(155). P. 19–26. EDN YMDWNC [in Russian].

4. Boos, I. Yu., Rudenko, E. A., Razin, A. I. [et al.] (2020). Determination of fracture orientation parameters using UAVs. *Moskovskiy Ekonomicheskiy Zhurnal [Moscow Economic Journal].* No. 10. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10640 [in Russian].

5. Zagibalov, A. V., Belyaev, E. N., Rakhimov, Sh. Sh., Botirov, Sh. S. (2024). Automation of open-pit slope deformation monitoring. *Universum: Tekhnicheskie Nauki [Universum: Technical Sciences].* No. 10(127). DOI 10.32743/UniTech.2024.127.10.18460 [in Russian].

6. Kosarev, N. S. (2025). On the need to develop domestic software for automated geodetic monitoring. *Vestnik SGUGiT [Bulletin of SSUGT].* Vol. 30, No. 3. P. 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14 [in Russian].

7. Litvinenko, N. V., Mavrin, I. D., Idrisov, A. F. (2024). On the selection of a methodology for detailed UAV-based surveying of open-pit slopes to assess their fracturing. *Aktualnye Problemy Sovremennoy Nauki, Tekhniki i Obrazovaniya [Current Problems of Modern Science, Technology, and Education].* Vol. 15, No. 1. P. 12–15. EDN DHTYKB [in Russian].

8. Dedkova, V. V. (2022). Investigation of image formation accuracy using cameras with focal-plane shutters during UAV-based aerial surveys. *Vestnik SGUGiT [Bulletin of SSUGT].* Vol. 27, No. 4. P. 54–60. EDN JQGXJZ [in Russian].

9. Khasanov, D. N. (2025). Methods for improving the accuracy of open-pit mining photogrammetry. *Problemy nedropol'zovaniya. [Subsoil Use Issues].* No. 1(44). P. 135–146. DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.135. EDN ORCEWX [in Russian].

10. Kirikov, D. A., Kalugina, A. M., Zhgilev, A. P. [et al.] (2024). Application of photogrammetry to determine the stability factor of an open-pit mine slope. *Nauki o Zemle i nedropol'zovaniye [Earth Sciences and Subsoil Use].* Vol. 47, No. 2(87). P. 180–189. DOI 10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189. EDN QQQSYB [in Russian].

11. Atik M.E., Arkali M. (2024). Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production. *Drones.* Vol. 8, No. 1. P. 15. DOI 10.3390/drones8010015 [in Russian].

12. Combining remote sensing techniques to optimize digital surface models for change detection: a case study at a pit wall in the Canadian Cordillera. *Natural Hazards.* 2025. Vol. 121. P. 22375–22401. DOI 10.1007/s11069-025-07688-0 [in Russian].

13. Yiğit A.Y., Şenol H.İ. (2025). Surface Change and Stability Analysis in Open-Pit Mines Using UAV Photogrammetric Data and Geospatial Analysis. *Drones.* Vol. 9, No. 7. P. 472. DOI 10.3390/drones9070472 [in Russian].

14. Topographic deformation and geomorphic instability of mine dump slopes: A UAV-based multi-scale analysis framework. *Journal of King Saud University – Science*. 2026. Vol. 38, No. 2. DOI 10.1016/j.jksus.2026.103456 [in Russian].

15. Tangadzani J., Paradzayi C., Muromo T. (2024). Application of UAV-based Photogrammetry in Monitoring Slope Deformations in Open Pit Mining Environments: A Systematic Review. *FIG Peer Review Journal.* P. 12400 [in Russian].

Об авторах

Евгения Владимировна Кайгородова – старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»; соискатель кафедры прикладной геодезии и горного дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Мируэрт Серикпаевна Тутанова – заведующая кафедрой МДиГ, старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»; аспирант кафедры прикладной геодезии и горного дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Наталья Анатольевна Немова – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геодезии и горного дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий; старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ Института горного дела Сибирского отделения Российской академии наук.

Authors details

Yevgeniya V. Kaygorodova – Senior Lecturer, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov; External PhD Candidate at the Department of Applied Geodesy and Mining, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Miruert S. Tutanova – Head of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Abylkas Saginov Karaganda Technical University; PhD Student, Department of Applied Geodesy and Mining, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Natalya A. Nemova — PhD, Associate Professor, Department of Applied Geodesy and Mining, Siberian State University of Geosystems and Technologies; Senior Research Fellow, Open-Cast Mining Laboratory, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

Получено / Received 02.04.2026
Поступила после рецензирования / Revised 24.08.2026
Принята к публикации / Accepted 23.09.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 528.024.1:551.466.7
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-21-33

Разложение приливного потенциала по сферическим гармоникам до пятой степени

В. Ф. Канушин[1], Д. Н. Голдобин[1], Н. Н. Кобелева[1]✉

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Аннотация. Разложение лунно-солнечного приливного потенциала на поверхности Земли в аналитические ряды является классической задачей теории земных приливов, решение которой постоянно уточняется уже около 140 лет. Данные разложения приливного потенциала широко применяются при исследовании земных приливов, а также при решении задач современной теории прецессии и нутации Земли. В статье представлена модель приливного потенциала в виде гармонического разложения по полиномам Лежандра до пятой степени включительно, причем каждая гармоника соответствует определенной периодичности приливов. Целью статье является разработка алгоритмов для получения моделей, составляющих приливного потенциала и его вертикальных производных до пятой степени гармонического разложения, обусловленных гравитационным влиянием Луны, Солнца и планет Солнечной системы. Приведены результаты вычисления модели приливного потенциала и его вертикальной производной для Новосибирска в течение 2025 г. Выполнено сравнение результатов вычисления вертикальной производной приливного потенциала с данными наблюдений приливной вариации силы тяжести, полученными по результатам измерений гравиметром Scintrex CG-6 Autograv. Установлена высокая корреляция между экспериментально измеренными и вычисленными на основе модели значениями приливных вариаций силы тяжести.

Ключевые слова: гравитация, полиномы Лежандра, сферические гармоники, приливный потенциал, постоянная Дудсена, приливные вариаций силы тяжести, гравиметрические измерения, гравитационное поле Земли, Луна, Солнце, планеты Солнечной системы

Для цитирования:
Канушин В. Ф., Голдобин Д. Н., Кобелева Н. Н. Разложение приливного потенциала по сферическим гармоникам до пятой степени. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 21–33. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-21-33

Decomposition of the tidal potential up to the 5th degree using spherical harmonics

V. F. Kanushin[1], D. N. Goldobin[1], N. N. Kobeleva[1]✉

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Abstract. The analytical decomposition of the lunisolar tidal potential is a classical, century-old problem in geodynamics, serving as a fundamental constraint for modern theories of Earth orientation parameters, specifically precession and nutation. The study presents a high-fidelity tidal potential model expressed as a harmonic expansion in terms of Legendre polynomials up to the 5th degree, where each term corresponds to a distinct tidal periodicity. The authors developed a comprehensive

© В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева, 2026

computational framework to derive the constituent components of the tidal potential and its vertical derivatives (up to the 5th order) induced by the gravitational perturbations of the Moon, the Sun, and the major planets. The model's performance is validated through a high-precision case study conducted in Novosibirsk over the span of 2025. The comparison of the theoretical gravity tides, specifically the first vertical derivative of the potential, with observational data recorded by a Scintrex CG-6 Autograv gravimeter was carried out. The results demonstrate a strong agreement between the experimentally observed gravity variations and the model-derived predictions.

Keywords: gravity, Legendre polynomials, spherical harmonics, tidal potential, Dudsen constant, tidal variations of gravity, gravimetric measurements, gravitational field of the Earth, Moon, Sun, planets of the Solar system

For citation:
Kanushin V. F., Goldobin D. N., Kobeleva N. N. (2026). Decomposition of the tidal potential up to the 5th degree using spherical harmonics. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 21–33. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-5-21-33

Введение

В настоящее время возрастает необходимость оценки и учета влияния вариаций гравитационного потенциала и силы тяжести на результаты высокоточных геодезических измерений. Значимость постановки и решения данной задачи для повышения точности геодезических определений была отмечена еще в 1957 г. выдающимся ученым М. С. Молоденским, который указывал на необходимость учета изменений гравитационного поля Земли при выполнении высокоточных измерений [1]. В последние годы вопросам моделирования приливных эффектов и вариаций силы тяжести уделяется значительное внимание как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях [2–4].

Возможность и необходимость учета влияния земных приливов на результаты геодезических измерений обусловлены тремя причинами: повышением точности современного определения координат точек до величины, соизмеримой с влиянием приливов; повышением точности приливных измерений; разработкой теоретической модели, обеспечивающей вычисление влияния прилива по результатам наблюдений [5].

При наблюдениях на геодезических пунктах используется астрономическая горизонтальная топоцентрическая система координат $OX^TY^TZ^T$, в которой ось Z^T направлена в астрономический зенит и совпадает с направлением отвеса. Так как приливные влияния вызывают колебания направления отвеса и смещение земной коры, то геодезические измерения, выполняемые на одном и том же пункте в различные моменты времени, выполняются в своей собственной мгновенной топоцентрической системе координат. Поскольку гравитационное воздействие Луны и Солнца изменяется в зависимости от положения точки на поверхности Земли, при выполнении высокоточных геодезических измерений возникает необходимость учета приливных влияний. Вопросы геодезических аспектов приливных воздействий рассматривались Международной ассоциацией геодезии (МАГ) на заседании в Канберре (Австралия) в 1979 г., по результатам которого было принято решение о необходимости исключения приливного влияния из результатов геодезических измерений [6]. Оно соответствует требованиям, возникающим при решении краевой задачи для определения возмущающего потенциала, согласно которым аномалии силы тяжести должны отражать влияние только аномальных масс внутри Земли [7].

Одним из основных методов математического описания приливных явлений служит представление приливообразующего потенциала на поверхности Земли в виде аналитических рядов. Данная задача относится к числу классических задач геодезии и небесной механики. Следует отметить, что методы ее решения и математические модели непрерывно совершенствуются почти 140 лет. Наиболее точные до недавнего

времени разложения приливообразующего потенциала были представлены в работе [8], основанной на применении аналитического метода, а также в исследованиях L. Hartmann и W. Wenzel [9], в которых использовался спектральный анализ Фурье по таблицам значений потенциала, вычисленных для временного интервала 1850–2150 гг. с использованием численной эфемериды DE-200 [10], впоследствии утратившей актуальность [11, 12].

В отличие от ранее предложенных подходов, в настоящем исследовании применяется оригинальный метод гармонического разложения по полиномам Лежандра до пятой степени включительно функции от координат Луны, Солнца и планет, где в качестве источника координат возмущающих тел используются наиболее точные на сегодняшний день долгосрочные численные эфемериды Луны и планет DE/LE-406 [13].

В рамках исследования рассматривается прямое приливное влияние на гравитационное поле Земли. При этом Земля считается твердым недеформируемым телом, небесное тело – материальной точкой с массой *M*.

Целью данной статьи является разработка алгоритмов для получения моделей, составляющих приливного потенциала и его вертикальных производных до пятой степени гармонического разложения, обусловленных гравитационным влиянием Луны, Солнца и всех планет Солнечной системы.

Для достижения поставленной цели необходимо представить модель приливного потенциала в виде разложения по сферическим функциям до пятой степени включительно, а также выполнить сравнение результатов вычисления вертикальной производной приливного потенциала с данными наблюдений приливных вариаций силы тяжести.

Методы и материалы

Классическая форма приливного потенциала W_B, создаваемого внешним телом с индексом *B* в точке *P* в момент *T* на поверхности Земли, представлена как в работе [8]

$$W_B = \frac{GM_B}{d_B}\left(\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{r'}{d_B}\right)^n P_n\left(\cos\psi\right)\right) = \sum_{n=2}^{\infty} W_B^n, \tag{1}$$

где $P_n\left(\cos\psi\right)$ – полином Лежандра степени *n* (из-за дополнительного эффекта сжатия Земли он начинается при *n* = 1 вместо классического расширения, которое начинается при *n* = 2;

d_B – мгновенное расстояние между Землей и возмущающим телом *B*;

r' – расстояние между центром Земли и положением станции на ее поверхности.

Выражение (1) обычно преобразуется к следующему виду:

$$W_B = \frac{3GM_B}{4}\frac{a^2}{c_B^3}\left(\frac{r'}{a}\right)^2\left(\frac{c_B}{d_B}\right)^3\left[\begin{array}{l}\frac{4}{3}P_2\left(\cos\psi\right)+\frac{4}{3}\frac{r'}{d_B}P_3\left(\cos\psi\right)+\\ \frac{4}{3}\left(\frac{r'}{4d_B}\right)^2 P_4\left(\cos\psi\right)+\frac{4}{3}\left(\frac{r'}{4d_B}\right)^3 P_5\left(\cos\psi\right)+\cdots\end{array}\right], \tag{2}$$

где *a* – большая полуось эллипсоида; c_B – среднее расстояние между Землей и возмущающим телом *B*.

Первая часть формулы (2) – это масштабный коэффициент, введенный Дудсоном в 1922 г. [14], зависящий от геоцентрического расстояния c_B до возмущающего тела *B*. Для Луны этот масштабный коэффициент равен

$$D_M\left(r'\right) = D_1\left(\frac{r'}{a}\right)^2 = \frac{3}{4}GM_M\frac{a^2}{c_M^3}\left(\frac{r'}{a}\right)^2, \tag{3}$$

где D_1 – константа, называемая постоянной Дудсона для Луны, определенная в работе [15]; M_M – масса Луны.

На рис. 1 представлен график изменения масштабного коэффициента $D_M(r')$, вычисленного по формуле (3) для Луны в период с 23.01 по 09.12.2025.

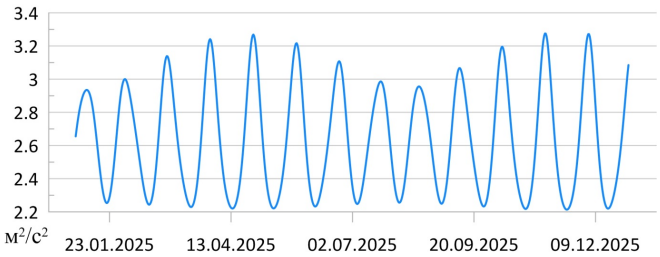


Рис. 1. График изменения масштабного коэффициента $D(r')$ для Луны

Из рис. 2 следует, что в течение 2025 г. масштабный коэффициент $D(r')$ для Луны изменялся в диапазоне от 2,210 до 3,275 м²/с².

Для Солнца масштабный коэффициент $D_S(r')$ равен

$$D_S(r') = D_S\left(\frac{r'}{a}\right)^2 = \frac{3}{4} G M_S \frac{a^2}{c_S^3}\left(\frac{r'}{a}\right)^2, \tag{4}$$

где D_S – постоянная Дудсона для Солнца; M_S – масса Солнца; c_S – геоцентрическое расстояние до Солнца.

На рис. 2 приведен график изменения масштабного коэффициента $D_S(r')$, вычисленного по формуле (4) для Солнца с 23.01 по 09.12.2025.

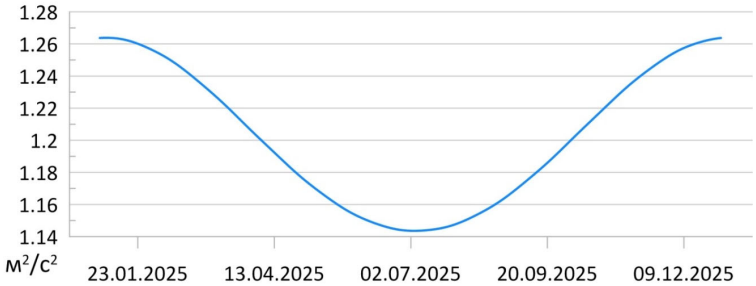


Рис. 2. График изменения масштабного коэффициента $D_S(r')$ для Солнца

Согласно данным, представленным на рис. 3, в течение 2025 г. масштабный коэффициент $D_S(r')$ для Солнца изменялся в пределах от 1,144 до 1,264 м²/с².

Для любого другого тела *B* можно ввести аналогичный масштабный коэффициент $D_B(r)$

$$D_B(r) = \frac{M_B}{M_M}\frac{c_B^3}{c_M^3} D(r'), \tag{5}$$

где M_B – масса небесного тела *B*.

Графики изменения масштабного коэффициента $D_B(r')$, вычисленного по фор-

муле (5) для планет Солнечной системы, показывают, что его значения убывают по величине от $6{,}86\times10^{-6}$ м$^2/c^2$ для Меркурия до $2{,}33\times10^{-9}$ м$^2/c^2$ для Нептуна.

В табл. 1 приведены статистические параметры распределения значений масштабных коэффициентов $D_M(r'), D_S(r'), D_B(r')$, вычисленных по формулам (3)–(5) за период с 23.01 по 09.12. 2025.

Таблица 1. Параметры распределения значений масштабных коэффициентов $D_M(r'), D_S(r'), D_B(r')$

Небесное тело	Мин. (м²/с²)	Макс. (м²/с²)	Диапазон (м²/с²)	Среднее (м²/с²)
Луна	2,213	3,275	1,062	2,635
Солнце	1,144	1,264	0,120	1,202
Меркурий	$1{,}96\times10^{-6}$	$6{,}86\times10^{-6}$	$4{,}90\times10^{-6}$	$3{,}62\times10^{-6}$
Венера	$7{,}62\times10^{-6}$	$7{,}93\times10^{-6}$	$3{,}16\times10^{-7}$	$7{,}80\times10^{-6}$
Марс	$8{,}39\times10^{-8}$	$1{,}33\times10^{-7}$	$4{,}87\times10^{-8}$	$9{,}67\times10^{-8}$
Юпитер	$8{,}11\times10^{-6}$	$8{,}74\times10^{-6}$	$6{,}33\times10^{-7}$	$8{,}42\times10^{-6}$
Сатурн	$3{,}85\times10^{-7}$	$3{,}98\times10^{-7}$	$1{,}37\times10^{-8}$	$3{,}91\times10^{-7}$
Уран	$7{,}03\times10^{-7}$	$7{,}10\times10^{-9}$	$6{,}83\times10^{-11}$	$7{,}06\times10^{-9}$
Нептун	$2{,}33\times10^{-9}$	$2{,}33\times10^{-9}$	$2{,}20\times10^{-12}$	$2{,}33\times10^{-9}$

Приведенные в табл. 1 средние значения масштабных коэффициентов можно использовать для приближенных вычислений приливных поправок и включить числовые множители $D_S(r')/D_M(r')$ и $D_B(r')/D_M(r')$ в числовые коэффициенты солнечной и планетарной частей приливного потенциала (2).

Выражения сферических функций $P_n(\cos\psi)$ в формуле (2) для степеней n = 2, …, 5 в аналитической форме имеют следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} P_2(\cos\psi) &= \frac{3}{2}\cos^2\psi - \frac{1}{2},\\ P_3(\cos\psi) &= \frac{5}{2}\cos^3\psi - \frac{3}{2}\cos\psi,\\ P_4(\cos\psi) &= \frac{35}{8}\cos^4\psi - \frac{15}{4}\cos^2\psi + \frac{3}{8},\\ P_5(\cos\psi) &= \frac{63}{8}\cos^5\psi - \frac{35}{4}\cos^2\psi + \frac{15}{8}\cos\psi. \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Подстановка выражения (6) в формулу (2) позволяет получить выражение для приливного потенциала

$$W_B = \frac{3GM_B}{4}\frac{a^2}{c_B^3}\left(\frac{r'}{a}\right)^2\left(\frac{c_B}{d_B}\right)^3\frac{2}{3}\left[\begin{aligned} &\left(3\cos^2\psi - 1\right) + \frac{r'}{d_B}\left(5\cos^3\psi - 3\cos\psi\right) + \\ &+\frac{r'^2}{4d^2{}_B}\left(35\cos^4\psi - 3\cos^2\psi + 3\right) + \\ &+\frac{r'^3}{4d^3{}_B}\left(63\cos^5\psi - 70\cos^3\psi + 15\cos\psi\right) + \ldots \end{aligned}\right]. \quad (7)$$

Однако формула (7) для вычисления приливного потенциала W_B неудобна, так как переменная ψ связана с локальной системой координат. В связи с этим используется стандартная экваториальная система координат, связанная с Землей, в которой (H, δ), где H – часовой угол, δ – склонение небесного тела, а φ и λ – соответственно географические широта и долгота пункта наблюдения.

Тогда согласно теореме косинусов для сферического треугольника имеем

$$\cos\psi = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos H. \quad (8)$$

В выражениях для $P_n(\cos\psi)$ в формулы (6) входят числовые коэффициенты и различные степени $\cos\psi$. Косинусы, возведенные в степени n = 2, …, 5 могут быть представлены следующим соотношением:

$$\cos^n \psi = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} \left(\sin\varphi \sin\delta\right)^{n-k} \left(\cos\varphi \cos\delta \cos H\right)^k. \tag{9}$$

Подставляя значения $\cos\psi$ и $\cos^n \psi$ из формул (8) и (9) в выражение приливного потенциала (7), получим выражения для составляющих приливного потенциала W_B^n, начиная со второй до пятой степени *n*, которые имеют следующий вид:

$$W_B^2 = D_B\left(r'\right)\left(\frac{c_B}{d_B}\right)^3 \times \left[\begin{array}{l} \left(1-3\sin^2\varphi\right)\left(\frac{1}{3}-\sin^2\delta\right)+\sin 2\varphi \sin 2\delta \cos H + \\ +\cos^2\varphi \cos^2\delta \cos 2H \end{array}\right], \tag{10}$$

$$W_B^3 = D_B\left(r'\right)\left(\frac{r'}{a}\right)\left(\frac{c_B}{d_B}\right)^4 \sin\pi_B \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3}\sin\varphi\left(3-5\sin^2\varphi\right)\sin\delta\left(3-5\sin^2\delta\right)+ \\ +\frac{1}{2}\cos\varphi\left(1-5\sin^2\varphi\right)\cos\delta\left(1-5\sin^2\delta\right)\cos H + \\ +5\cos^2\varphi \sin\varphi \sin\delta \cos^2\delta \cos 2H + \\ +\frac{5}{6}\cos^3\varphi \cos^2\delta \cos 3H \end{array}\right], \tag{11}$$

$$W_B^4 = D_B\left(r'\right)\left(\frac{r'}{a}\right)^2\left(\frac{C_B}{D_B}\right)^5 \sin^2\pi_B \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{48}\left(3-30\sin^2\varphi+35\sin^4\varphi\right)\left(3-30\sin^2\delta+35\sin^4\delta\right)+ \\ +\frac{5}{24}\sin 2\varphi\left(3-7\sin^2\varphi\right)\sin 2\delta\left(3-7\sin^2\delta\right)\cos H + \\ +\frac{5}{12}\cos^2\varphi\left(1-7\sin^2\varphi\right)\cos^2\delta\left(1-7\sin^2\delta\right)\cos 2H + \\ +\frac{35}{6}\sin\varphi \cos^3\varphi \sin\delta \cos^2\delta \cos 3H + \\ +\frac{35}{48}\cos^4\varphi \cos^4\delta \cos 4H \end{array}\right], \tag{12}$$

$$W_B^5 = D_B\left(r'\right)\left(\frac{r'}{a}\right)^3\left(\frac{C_B}{D_B}\right)^6 \sin^3\pi_B \times$$

$$\times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{48}\sin\varphi\left(15-70\sin^2\varphi+63\sin^4\varphi\right)\sin\delta\left(15-70\sin^2\delta+63\sin^4\delta\right)+ \\ +\frac{5}{16}\cos\varphi\left(-1+14\sin^2\varphi-21\sin^4\varphi\right)\cos\delta\left(-1+14\sin^2\delta-21\sin^4\delta\right)\cos H + \\ +\frac{35}{4}\sin\varphi\left(-1+4\sin^2\varphi-3\sin^4\varphi\right)\sin\delta\left(-1+4\sin^2\delta-3\sin^4\delta\right)\cos 2H + \\ +\frac{35}{96}\cos^3\varphi\left(1-9\sin^2\varphi\right)\cos^3\delta\left(1-9\sin^2\delta\right)\cos 3H + \\ +\frac{105}{16}\sin\varphi\left(1-2\sin^2\varphi+\sin^4\varphi\right)\sin\delta\left(1-2\sin^2\delta+\sin^4\delta\right)\cos 4H + \\ +\frac{21}{32}\cos^5\varphi \cos^5\delta \cos 5H \end{array}\right]. \tag{13}$$

Учет возмущений от твердых земных приливов был выполнен с использованием модифицированной программной библиотеки SOFA, рекомендованной Международным астрономическим союзом (IAU) [16].

Результаты исследования

Результаты вычисления по формулам (10)–(13) составляющих приливного потенциала, начиная со второй до пятой степени, обусловленных гравитационным притяжением Луны, приведены в виде графиков на рис. 3.

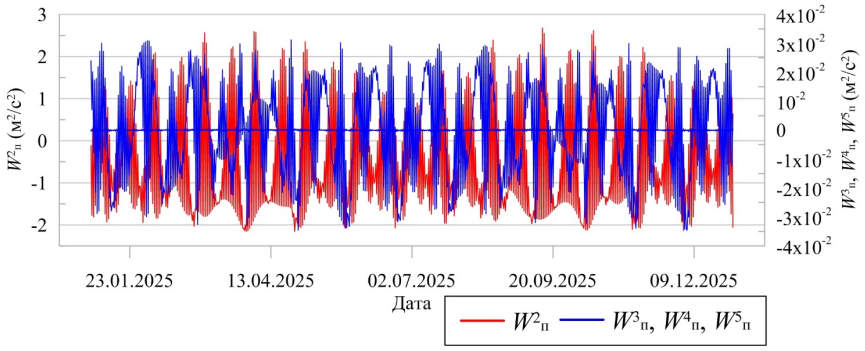


Рис. 3. Графики изменения во времени составляющих приливного потенциала, обусловленных гравитационным притяжением Луны

В табл. 2 приведены статистические параметры распределения составляющих лунного приливного потенциала, вычисленных по формулам (10)–(13).

Таблица 2. Параметры распределения составляющих лунного приливного потенциала

Статистические величины	W^2	W^3	W^4	W^5	W
Мин.	– 2,156	– 0,035	– 0,002	$-9\cdot10^{-06}$	– 2,155
Макс.	2,680	0,031	0,001	$8\cdot10^{-06}$	2,708
Диапазон	4,836	0,066	0,003	$2\cdot10^{-05}$	4,863
Среднее	– 0,581	$-7\cdot10^{-05}$	$-5\cdot10^{-06}$	$-1\cdot10^{-07}$	– 0,581

Приведенные в табл. 2 параметры распределения изменения во времени составляющих лунного приливного потенциала W_B^n показали, что составляющая второй степени W_B^2 превосходит в максимуме по величине составляющие потенциалов третьей степени W_B^3 в 90 раз, четвертой W_B^4 и пятой W_B^5 – более чем в 30 000 раз.

На рис. 4 приведены в виде графиков результаты вычисления по формулам (10)–(13) составляющих солнечного приливного потенциала W_B^n до пятой степени.

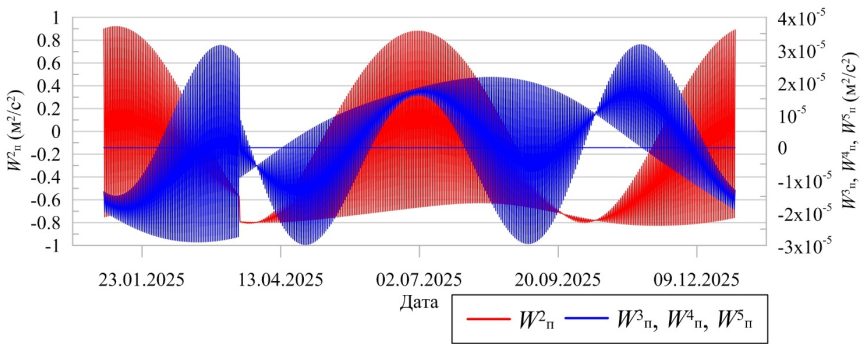


Рис. 4. График изменения во времени составляющих приливного потенциала, обусловленных гравитационным притяжением Солнца

В табл. 3 приведены параметры распределения составляющих солнечного приливного потенциала.

Таблица 3. Параметры распределения составляющих солнечного приливного потенциала

Статистические величины	W^2	W^3	W^4	W^5	W
Мин.	– 0,826	$-2{,}9\cdot10^{-05}$	$-1{,}3\times10^{-09}$	$-4{,}8\times10^{-14}$	– 0,826
Макс.	0,920	$3{,}1\cdot10^{-05}$	$1{,}1\times10^{-09}$	$5{,}7\times10^{-14}$	0,920
Диапазон	1,745	$6{,}1\cdot10^{-05}$	$2{,}5\times10^{-09}$	$1{,}1\times10^{-13}$	1,745
Среднее	– 0,301	$2{,}9\cdot10^{-07}$	$-1{,}4\times10^{-10}$	$4{,}9\times10^{-16}$	– 0,301

Анализ результатов, представленных в табл. 3, показывает, что составляющая солнечного приливного потенциала второй степени на несколько порядков превышает остальные гармонические составляющие солнечного приливного потенциала.

Порядок величин составляющих приливного потенциала, обусловленных воздействием планет, находится в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-11} м²/с². При этом максимальные значения приливных составляющих наблюдаются у Юпитера и достигают $6{,}5\times10^{-6}$ м²/с².

Для подтверждения теоретических расчетов составляющих потенциала приливного притяжения небесных тел W_B^n, представленных в табл. 2 и 3, выполнено сравнение фактических вариаций силы тяжести, вызванных лунно-солнечным приливом, с теоретическими вертикальными составляющими приливной силы. Указанные составляющие получены путем дифференцирования выражений (10)–(13) по вертикали r' и имеют следующий вид:

$$\delta g_B^2 = -1.15\cdot GM_B\frac{r'}{d_B^3}\begin{bmatrix}\left(1-3\sin^2\varphi\right)\left(\frac{1}{3}-\sin^2\delta\right)+\\ +\sin 2\varphi\sin 2\delta\cos H+\\ +\cos^2\varphi\cos^2\delta\cos 2H\end{bmatrix}, \qquad (14)$$

$$\delta g_B^3 = -1{,}15 \cdot GM_B \frac{3}{2}\frac{r'^2}{d_B^4}\left[\begin{array}{l} \frac{1}{3}\sin\varphi\left(3-5\sin^2\varphi\right)\sin\delta\left(3-5\sin^2\delta\right)+ \\ +\frac{1}{2}\cos\varphi\left(1-5\sin^2\varphi\right)\cos\delta\left(1-5\sin^2\delta\right)\cos H+ \\ +5\cos^2\varphi\sin\varphi\sin\delta\cos^2\delta\cos 2H+ \\ +\frac{5}{6}\cos^3\varphi\cos^2\delta\cos 3H \end{array}\right], \quad (15)$$

$$\delta g_B^4 = -1{,}15 \cdot GM_B 3\frac{r'^3}{d_B^5}\cdot\left[\begin{array}{l} \frac{1}{48}\left(3-30\sin^2\varphi+35\sin^4\varphi\right)\left(3-30\sin^2\varphi+35\sin^4\varphi\right)+ \\ +\frac{5}{24}\sin 2\varphi\left(3-7\sin^2\varphi\right)\sin 2\delta\left(3-7\sin^2\delta\right)\cos H+ \\ +\frac{5}{12}\cos^2\varphi\left(1-7\sin^2\varphi\right)\cos^2\delta\left(1-7\sin^2\delta\right)\cos 2H+ \\ +\frac{35}{6}\sin\varphi\cos^3\varphi\sin\delta\cos^2\delta\cos 3H+ \\ +\frac{35}{48}\cos^4\varphi\cos^4\delta\cos 4H \end{array}\right], \quad (16)$$

$$\delta g_B{}^5 = -1{,}15 \cdot GM_B \frac{18}{4}\frac{r^5}{d^6}\times$$

$$\times\left[\begin{array}{l} \frac{1}{48}\sin\varphi\left(15-70\sin^2\varphi+63\sin^4\varphi\right)\sin\delta\left(15-70\sin^2\delta+63\sin^4\delta\right)+ \\ +\frac{5}{16}\cos\varphi\left(-1+14\sin^2\varphi-21\sin^4\varphi\right)\cos\delta\left(-1+14\sin^2\delta-21\sin^4\delta\right)\cos H+ \\ +\frac{35}{4}\sin\varphi\left(-1+4\sin^2\varphi-3\sin^4\varphi\right)\sin\delta\left(-1+4\sin^2\delta-3\sin^4\delta\right)\cos 2H+ \\ +\frac{35}{96}\cos^3\varphi\left(1-9\sin^2\varphi\right)\cos^3\delta\left(1-9\sin^2\delta\right)\cos 3H \\ +\frac{105}{16}\sin\varphi\left(1-2\sin^2\varphi+\sin^4\varphi\right)\sin\delta\left(1-2\sin^2\delta+\sin^4\delta\right)\cos 4H+ \\ +\frac{21}{32}\cos^5\varphi\cos^5\delta\cos 5H \end{array}\right]. \quad (17)$$

Наблюдения вариаций силы тяжести, обусловленных лунно-солнечными приливами, выполнялись с использованием двух современных гравиметров Scintrex CG-6 Autograv в течение четырех суток – с 28.03 по 01.04.2025 внутри здания лабораторного корпуса Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

По результатам наблюдений, выполненных с использованием гравиметров, и расчетных значений приливных вариаций силы тяжести, полученных по формулам (14)–(17), были построены графики, представленные на рис. 5.

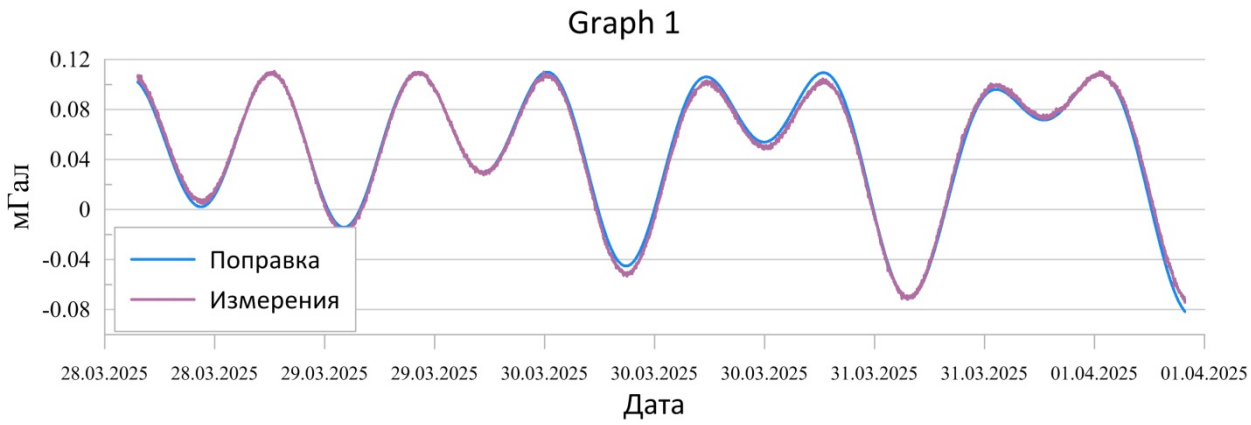


Рис. 5. Графики приливной вариации силы тяжести

Как следует из рис. 6, теоретически рассчитанные и экспериментально измеренные приливные вариации силы тяжести характеризуются высокой степенью согласованности. Коэффициент корреляции между расчетными и наблюдаемыми значениями приливной вариации силы тяжести составил 0,97, что свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов.

В табл. 4 приведены параметры распределения разностей между измеренными и вычисленными по формулам (14)–(17) приливными вариациями силы тяжести.

Таблица 4. Параметры распределения разностей приливных вариаций силы тяжести

Статистические величины	Разности приливных вариаций силы тяжести, мГал
Мин.	–0,01165
Макс.	0,010284
Диапазон	0,021935
Среднее	0,000734
Стандартное отклонение	0,004047

Из данных, представленных в табл. 3, следует, что стандартное отклонение разностей между измеренными и вычисленными по формулам (14)–(17) значениями приливных вариаций силы тяжести составило 0,0040 мГал, а среднее отклонение – 0,0007 мГал. Таким образом, результаты гравиметрических наблюдений подтверждают корректность теоретических расчетов приливного воздействия небесных тел, выполненных по формулам (14)–(17), и, следовательно, подтверждают теоретические расчеты по формулам (10)–(13) составляющих потенциала приливного притяжения небесных тел W_B^n, приведенных в табл. 2–4.

Заключение

По результатам выполненного исследования сформулированы следующие выводы.

Разработан алгоритм гармонического разложения приливообразующего потенциала на поверхности Земли, обеспечивающий возможность вычисления составляющих приливного потенциала и их вертикальных производных для заданной точки и фиксированного момента времени.

Установлено, что составляющие лунного и солнечного приливного потенциала второй степени W_B^2 превосходят по величине составляющие потенциалов третьей W_B^3, четвертой W_B^4 и пятой W_B^5 степеней в несколько раз.

Показано, что величины составляющих приливного потенциала, обусловленных воздействием планет, находятся в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-11} м^2/с^2. Наибольший вклад среди планетарных составляющих наблюдается у Юпитера и составляет $6{,}5\times10^{-6}$ м²/с².

Сопоставление фактических приливных вариаций силы тяжести, полученных по результатам наблюдений гравиметрами Scintrex CG-6 Autograv, с теоретическими значениями, вычисленными по формулам (14)–(17), продемонстрировало высокую степень согласованности экспериментальных и расчетных данных. Достоверность используемых моделей подтверждается высоким коэффициентом корреляции между теоретическими и измеренными значениями приливной вариации силы тяжести, равным 0,97, а также стандартным отклонением 0,004 мГал.

Полученные теоретические и численные результаты свидетельствуют о том, что основной вклад в гравитационный потенциал Земли вносят Луна и Солнце, тогда как влияние остальных планет Солнечной системы является существенно меньшим.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ » с целью создания высокоточных моделей гравитационного поля Земли и его характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Молоденский М. С. Новые методы изучения фигуры Земли. Геодезия и картография. 1957. № 11. С. 5–10.
2. Михайлов В. О., Смирнов А. В. Исследование приливных вариаций силы тяжести по данным современных гравиметрических наблюдений. Геодезия и картография. 2021. № 5. С. 14–22.
3. Boy J.-P., Hinderer J. Study of the seasonal gravity signal in superconducting gravimeter data. Journal of Geodynamics. 2018. Vol. 80. P. 1–10.
4. Van Camp M., de Viron O. Environmental contributions to gravity time variations observed with superconducting gravimeters. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. Vol. 124. P. 123–137.
5. Мельников А. А., Черников А. С. Учет приливных деформаций Земли при высокоточных геодезических измерениях. Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 4. С. 45–56.
6. Resolutions as proposed by the International Association of Geodesy and endorsed by the International Union of Geodesy and Geophysics : Canberra, 2–14 December 1979. XVI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Canberra, 1979.
7. Petit G., Luzum B. IERS Conventions (2010). Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
8. Roosbeek F. RATGP95: a harmonic development of the tide-generating potential using an analytical method. Geophysical Journal International. 1996. Vol. 126. P. 197–204.
9. Hartmann T., Wenzel H.-G. Catalogue HW95 of the tide generating potential. Bulletin d'Informations Marées Terrestres. 1995. Vol. 123. P. 9278–9301.
10. Standish E. M., Williams J. G. Planetary and lunar ephemerides DE200-LE200 [Electronic resource]. Available at: ftp://nav.jpl.nasa.gov/pub/ephem/export/ (accessed 28.02.2026).
11. Kudryavtsev S. M. Improved harmonic development of the Earth tide-generating potential. Journal of Geodesy. 2004. Vol. 77. P. 829–838.
12. Agnew D. C. Earth tides. Treatise on Geophysics. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2015. Vol. 3. P. 151–178.
13. Standish E. M. JPL planetary and lunar ephemerides DE405/LE405. Pasadena : Jet Propulsion Laboratory, 1998. JPL IOM 312.F-98-048.
14. Doodson A. T. The harmonic development of the tide-generating potential. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1922. Vol. 100. P. 305–329.
15. Xi Q. A new complete development of the tide-generating potential for the epoch J2000.0. Bulletin d'Informations Marées Terrestres. 1987. Vol. 99. P. 1347–1369.

16. International Astronomical Union (IAU). Available at: https://www.iausofa.org/ (accessed 29.02.2026).

REFERENCES

1. Molodenskiy, M. S. (1957). New methods for studying the figure of the Earth. *Geodeziya i* kartografiya [Geodesy and Cartography], 11, 5–10 [in Russian].

2. Mikhaylov, V. O., & Smirnov, A. V. (2021). Investigation of tidal gravity variations based on modern gravimetric observations. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography],* 5, 14–22 [in Russian].

3. Boy, J.-P., & Hinderer, J. (2018). Study of the seasonal gravity signal in superconducting gravimeter data. *Journal of Geodynamics*, 80, 1–10.

4. Van Camp, M., & de Viron, O. (2019). Environmental contributions to gravity time variations observed with superconducting gravimeters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 123–137.

5. Melnikov, A. A., & Chernikov, A. S. (2022). Accounting for tidal deformations of the Earth in high-precision geodetic measurements. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 27(4), 45–56 [in Russian].

6. Resolutions as proposed by the International Association of Geodesy and endorsed by the International Union of Geodesy and Geophysics: Canberra, 2–14 December 1979. (1979). In *XVI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*. Canberra.

7. Petit, G., & Luzum, B. (2010). *IERS Conventions (2010)*. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179 p.

8. Roosbeek, F. (1996). RATGP95: A harmonic development of the tide-generating potential using an analytical method. *Geophysical Journal International*, 126, 197–204.

9. Hartmann, T., & Wenzel, H.-G. (1995). Catalogue HW95 of the tide generating potential. *Bulletin d'Informations Marées Terrestres*, 123, 9278–9301.

10. Standish, E. M., & Williams, J. G. Planetary and lunar ephemerides DE200-LE200. Available at: ftp://nav.jpl.nasa.gov/pub/ephem/export/ (accessed February 28, 2026).

11. Kudryavtsev, S. M. (2004). Improved harmonic development of the Earth tide-generating potential. *Journal of Geodesy*, 77, 829–838.

12. Agnew, D. C. (2015). Earth tides. In *Treatise on Geophysics* (2nd ed., Vol. 3, pp. 151–178). Amsterdam: Elsevier.

13. Standish, E. M. (1998). *JPL planetary and lunar ephemerides DE405/LE405*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. JPL IOM 312.F-98-048.

14. Doodson, A. T. (1922). The harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 100, 305–329.

15. Xi, Q. (1987). A new complete development of the tide-generating potential for the epoch J2000.0. *Bulletin d'Informations Marées Terrestres*, 99, 1347–1369.

16. International Astronomical Union (IAU). Available at: International Astronomical Union (IAU) (accessed February 29, 2026).

Об авторах

Вадим Федорович Канушин – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Денис Николаевич Голдобин – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Наталья Николаевна Кобелева – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Author details

Vadim F. Kanushin – PhD, Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.
Denis N. Goldobin – PhD, Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.
Natalia N. Kobeleva – PhD, Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Получено / Received 10.06.2026
Поступила после рецензирования / Revised 17.08.2026
Принята к публикации / Accepted 21.09.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 528.721.221.6
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-34-44

Методика оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи наземного лазерного сканера

А. О. Куприянов[1], Д. А. Морозов[1], Д. С. Мелихова[1]✉, П. В. Молоков[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: melihova_darua@mail.ru

Аннотация. В статье представлена методика оценки качества данных наземного лазерного сканирования высокодетализированных поверхностей. Рассмотрены возможные сферы применения данной методики и основные факторы, влияющие на качество данных. Экспериментальная апробация методики выполнена с использованием трехмерных марок с известными геометрическими параметрами и двух наземных лазерных сканеров – Leica RTC360 и Trimble TX6. Обработка данных производилась с применением программного обеспечения CloudCompare, Leica REGISTER 360 PLUS, Trimble RealWorks и Leica Cyclone 3DR. По результатам обработки вычислены статистические показатели, выступающие в качестве критериев качества сканирования, и проведена интерпретация полученных результатов. Оценена повторяемость (СКП от 1 до 14 %) результатов получения параметров, характеризующих качество материалов лазерного сканирования, и выполнен сравнительный анализ разностей параметров и наблюдаемых отличий в облаках точек для использованных сканеров. Разработанный подход позволяет оценивать качество сканирования объектов, характерные размеры элементов которых составляют первые сантиметры.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, оценка точности, высокодетализированные поверхности, облако точек, оценка качества, трехмерные марки, математическая статистика, прикладная геодезия

Для цитирования:
Куприянов А. О., Морозов Д. А., Мелихова Д. С., Молоков П. В. Методика оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи наземного лазерного сканера. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 34–44. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-34-44

Methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning of highly detailed surfaces

A. O. Kupriyanov[1], D. A. Morozov[1], D. S. Melikhova[1]✉, P. V. Molokov[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: melihova_darua@mail.ru

Abstract. The article presents a methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning (TLS) data acquired over highly detailed surfaces. Potential application domains and the principal factors influencing data quality are discussed. Experimental validation was conducted using three-dimensional targets with known geometric parameters and two TLS instruments: the Leica RTC360 and the Trimble TX6. Data processing was performed in CloudCompare, Leica REGISTER 360 PLUS, Trimble RealWorks, and Leica Cyclone 3DR. Statistical metrics were derived from the processing results and adopted as cri-

© А. О. Куприянов, Д. А. Морозов, Д. С. Мелихова, П. В. Молоков, 2026

teria for scanning quality, followed by interpretation of the findings. Repeatability was assessed (RMSE ranging from 1 to 14%) for parameters characterizing TLS data quality, and a comparative analysis of parameter differences and observed discrepancies in the point clouds from the two scanners was carried out. The proposed approach enables quality assessment of scans of objects with characteristic feature sizes on the order of a few centimeters.

Keywords: terrestrial laser scanning, accuracy assessment, highly detailed surfaces, point cloud, quality assessment, 3D targets, mathematical statistics, applied geodesy

For citation:
Kupriyanov A. O., Morozov D. A., Melikhova D. S., Molokov P. V. (2026). Methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning of highly detailed surfaces. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 34–44. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-34-44

Введение

Технология наземного лазерного сканирования (НЛС) широко применяется для дистанционного получения высокоточных пространственных данных об объекте, что востребовано для инженерных сооружений [1–3], памятников историко-культурного наследия [4–6], зданий сложной конфигурации [7], отдельно стоящих малых архитектурных форм [8]. Эти объекты характеризуются элементами высокой плотности детализации. К ним относятся детали инженерных систем (узлы, сварочные швы, фланцевые соединения, отводы, трубы малого диаметра) [9, 10], декоративные элементы фасадов и интерьеров (барельефы, скульптурная лепнина, колонны, арки) [11], а также детали скульптур и памятников разных форм с выраженной трехмерной текстурой и орнаментом, компоненты пространственных конструкций, характеризующиеся узловыми соединениями [12]. На таких объектах технология НЛС применяется для мониторинга технического состояния с целью выявления процессов деформаций; обследования для разработки проектной документации реставрации или реконструкции с фиксацией подлинной геометрической конфигурации объекта, создания цифровых двойников для интеграции с технологиями информационного моделирования (ТИМ) и обратного проектирования. Для поверхностей с высокой плотностью детализации, характерные элементы которых имеют размеры в пределах первых сантиметров, на точность получаемых пространственных данных влияют следующие факторы [13–17]: дивергенция лазерного луча, методы обработки измерительной информации в сканере (в частности алгоритмы фильтрации шумов), угол падения луча на поверхность и т. д. Дивергенция лазерного луча влияет на точность сканирования сложных поверхностей. В отличие от плоских поверхностей, перпендикулярных лучу, на сложных поверхностях из-за размера пятна (который зависит от характеристик сканера и расстояния) расстояние измеряется до «средней» точки. Ее положение зависит от формы поверхности и алгоритмов обработки в оборудовании. Погрешности измерения углов незначительны для плоских объектов, но критичны для высокодетализированных поверхностей. Следует отметить, что влияние вышеперечисленных факторов на качество сканирования напрямую не может быть выведено только из паспортных характеристик прибора и требует целенаправленных экспериментальных исследований.

Цель настоящей статьи – разработка методики оценки качества НЛС детализированных поверхностей. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи: проанализировать сферы применения НЛС; определить факторы, влияющие на качество сканирования высокодетализированных поверхностей; разработать методику; запроектировать и изготовить экспериментальные трехмерные марки; выполнить апробацию разработанной методики; проанализировать полученные результаты.

Методы и материалы

Для оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи НЛС предлагается следующая методика:

1) в качестве референсных поверхностей используются трехмерные марки, изготавливаемые следующим образом: проектируются трехмерные модели марок с требуемой текстурой; модели печатаются на 3D-принтере и крепятся к адаптеру; производятся контрольные промеры для сравнения напечатанных марок с исходной моделью и оценки точности изготовления;

2) выполняется сканирование марок при помощи исследуемого сканера с минимального расстояния сканирования и с расстояния 2,2 м. В процессе сканирования контролируются микроклимат помещения и освещенность марки;

3) для каждой марки выполняется обработка в следующем порядке:

– полученное облако точек лазерных отражений (ТЛО) сшивается с референсной моделью марки;

– выполняется сравнение положения точек облака ТЛО с референсной моделью при помощи программного обеспечения (ПО) CloudCompare, вычисляются смещения ТЛО по расстоянию и каждой из координатных осей (dX, dY, dZ);

– вычисляются критерии качества сканирования по совокупности вычисленных отклонений отдельно для каждой координатной оси. В качестве критериев используются:

– средняя квадратическая погрешность (СКП) m;

– процент значений, выходящих за пределы доверительного интервала для доверительной вероятности 68,27 % (d_m), 95,45 % (d_{2m}) и 99,73 % (d_{3m});

– эксцесс (E) и асимметрия (A) выборки;

– коэффициент корреляции между отклонением и положением точки по оси X (r_X) и Y (r_Y);

– коэффициент корреляции между отклонениями по трем координатным осям X, Y, Z ($r_{\Delta X}$, $r_{\Delta Y}$, $r_{\Delta Z}$);

4) производится анализ вычисленных критериев и формулируются выводы касательно качества сканирования детализированных поверхностей исследуемым сканером.

Для реализации методики использовались три типа марок:

1) марка № 1 размерами 0,2 × 0,2 м с выпуклыми гранями следующих размеров: 0,005; 0,03; 0,025; 0,02; 0,015; 0,015; 0,005 м; углубления марки составляют 0,015 м;

2) марка № 2 размерами 0,2 × 0,2 м с выпуклыми гранями размерами 0,01 м по краям и 0,015 м – в остальных местах; углубления марки составляют 0,015 м;

3) третья марка размерами 0,2 × 0,2 м в виде персонажа древнегреческой мифологии Медузы. Данная марка отличается высокодетализированной трехмерной текстурой, так как каждый сантиметр содержит в себе множество элементов.

Трехмерные модели марок были созданы в программе Autodesk AutoCAD. Марки были изготовлены при помощи технологии 3D-печати из пластмассы на принтере Elegoo Neptun. Внешний вид марок с установленным креплением для стандартной геодезической подставки приведен ниже (рис. 1).

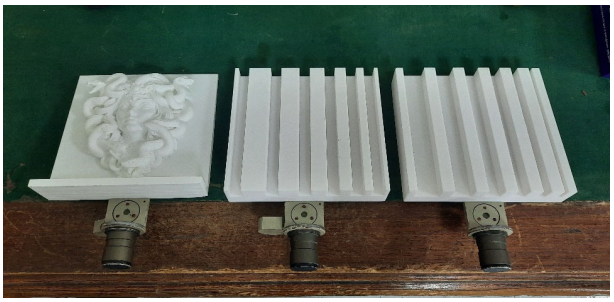


Рис. 1. Готовые марки с креплениями для установки на подставке

Номинальная точность печати в соответствии с паспортными характеристиками для данной модели принтера составляет ±0,1 мм. Для оценки фактической точности изготовления марок были проведены контрольные обмеры, выполненные штангенциркулем ЧИЗ ШЦ-1-150, СКП которого составляет 0,02 мм. Для каждой марки были выполнены промеры расстояний между парами характерных точек (для марки № 1 выполнено 33 промера, для марки № 2 – 34 промера, для марки «Медуза» – 20 промеров).

Априорные значения расстояний между характерными точками были получены по ис-

ходным трехмерным моделям марок в ПО CloudCompare. Для каждой пары характерных точек была вычислена разность расстояния Δ_S, измеренного натурно штангенциркулем и по цифровой модели в программном обеспечении:

$$\Delta_S = S_{nature} - S_{project}, \qquad (1)$$

где S_{nature} – расстояние, вычисленное между характерными точками натурно; $S_{project}$ – расстояние, вычисленное между характерными точками в программном обеспечении.

Значение средней квадратической погрешности взаимного положения точек марки m_p вычисляется по следующей формуле:

$$m_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{\sqrt{\sum_1^n (\Delta_S)^2}}{n}, \qquad (2)$$

где n – количество промеров.

По результатам вычислений получены следующие СКП взаимного положения точек марок: для марки «Медуза» – 0,33 мм; для марки с выпуклыми гранями различных размеров – 0,30 мм; для марки с выпуклыми гранями одинаковых размеров – 0,26 мм. Таким образом, погрешности изготовления марок в три и более раза меньше, чем погрешности сканирования, не окажут существенного влияния на оценку критериев качества сканирования.

В ходе апробации методики были использованы два наземных лазерных сканера: Leica RTC360 и Trimble TX6. Первый из них предоставлен Центром коллективного пользования «Центр высокоточной навигации, позиционирования и систем сбора пространственных данных» Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). Основные технические характеристики данных приборов систематизированы ниже (табл. 1).

Таблица 1. Основные технические характеристики Leica RTC360 и Trimble TX6

Основные характеристики	Leica RTC360	Trimble TX6
Размер лазерного пятна на поверхности на дистанции в 10 м	6 мм	6 мм
СКП измерения углов	18"	16,5"
СКП измерения расстояний	1 мм + 10 ppm	2 мм
Диапазон измерений	От 0,5 до 130 м	От 0,6 м до 120 м

Приведенные инструменты имеют близкие технические характеристики, но при этом основаны на разной технологической базе и относятся к разным поколениям (год выпуска Leica RTC360 – 2025, Trimble TX6 – 2016). Исходя из этого и предварительных визуальных оценок облаков точек лазерных отражений, получаемых при помощи этих инструментов, можно рассчитывать на получение ощутимой разницы в критериях качества, вычисленных при реализации методики.

При выполнении измерений обеспечивалась установка инструмента и марки на стабильных основаниях (рис. 2).

а) *б*) *в*)

Рис. 2. Выполнение измерений на дистанции 0,5 м с использованием Leica RTC360: *а*) марка «Медуза»; *б*) марка № 1; *в*) марка № 2

В процессе проведения измерений обеспечивался контроль микроклиматических параметров (температура, относительная влажность) и освещенности для соблюдения стандартных условий при выполнении эксперимента двумя приборами, так как даже небольшие искажения могут существенно повлиять на результаты сканирования. Для измерения уровня освещенности в помещениях был использован люксметр ЭКСИС ЛМ-12, для измерения температуры и относительной влажности использовался термогигрометр МЕГЕОН 20062. Параметры микроклимата в лабораторном помещении составляли: температура воздуха – 20–21 °С, относительная влажность – 63–65 %, освещенность – 520 лк.

Все измерения для каждой марки выполнялись двух расстояниях:

1) на минимальной паспортной дистанции: 0,5 м для Leica RTC360 и 0,6 м для Trimble TX6;

2) на дистанции в 2,2 м для обоих приборов.

Предобработка полученных данных осуществлялась в программных комплексах Leica REGISTER 360 PLUS и Trimble RealWorks, где была выполнена регистрация облаков точек. Для очистки данных от посторонних элементов использовалось ПО Leica Cyclone 3DR, после чего трехмерные данные были выгружены в формат E57.

Сравнение полученных облаков точек в формате E57 с эталонными моделями в формате STL выполнялось в ПО Cloud Compare. Для этого каждая эталонная марка была преобразована в облако точек с помощью инструмента Sample points on a mesh. Затем с использованием инструмента Compute cloud/cloud distance производилось сравнение между эталонными облаками точек и облаками точек, полученными в ходе измерений. Так были получены отклонения измеренных марок от эталонных в цифровом виде. Вычисление статистик, которые выступают в качестве критериев качества сканирования, производилось по полученным данным в Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

По результатам апробации методики получены следующие данные:

1) критерии качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстояниях 0,5 и 2,2 м для трех типов объемных марок (табл. 2);

2) критерии качества сканирования для НЛС Trimble TX6 на расстояниях 0,6 и 2,2 м для трех типов объемных марок (табл. 3);

3) критерии качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстоянии 2,2 м для 7 независимых повторений методики.

Таблица 2. Критерии качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстояниях 0,5 и 2,2 м для трех типов объемных марок по координатным осям

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,5 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 1					
m, м	0,0011	0,0002	0,0011	0,0007	0,0002	0,0008
$\lvert d \rvert > m$, %	23,95	22,45	27,60	13,91	30,85	25,33
$d_m \lvert d \rvert > 2 \cdot m$, %	21,15	2,31	6,51	7,16	4,40	6,22
$\lvert d \rvert > 3 \cdot m$, %	3,72	0,69	1,00	3,47	0,26	1,49
A / E	–0,09/2,90	2,41/30,54	0,50/1,79	0,17/2,42	1,20/0,88	–0,62/3,89
r_X	0,36043	0,02735	–0,00345	0,00308	–0,34767	0,15368
r_Y	–0,10135	0,06336	0,00708	–0,04090	0,03263	–0,05328
$r_{\Delta X}$	1	–0,00299	–0,01913	1	–0,00997	–0,01497
$r_{\Delta Y}$	–0,00299	1	0,05429	–0,00997	1	–0,29888
$r_{\Delta Z}$	–0,01913	0,05429	1	–0,01497	–0,29888	1

Окончание табл. 2

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,5 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 2					
m, м	0,0010	0,0002	0,0011	0,0008	0,0002	0,0009
$\lvert d \rvert > m$, %	20,45	25,51	26,90	15,71	31,18	25,08
$\lvert d \rvert > 2 \cdot m$, %	7,55	8,46	6,57	7,55	2,61	6,57
$\lvert d \rvert > 3 \cdot m$, %	2,54	0,34	1,04	2,52	0,33	1,49
A/E	–0,08/4,80	1,77/26,38	0,47/2,26	1,66/10,33	3,83/23,13	–0,51/9,59
r_X	0,34391	0,02150	–0,04597	0,20409	–0,28784	0,05370
r_Y	–0,04970	–0,03758	0,00681	0,00045	0,11516	–0,05066
$r_{\Delta X}$	1	0,00089	–0,01720	1	0,00585	–0,01064
$r_{\Delta Y}$	0,00089	1	0,00044	0,00585	1	–0,27871
$r_{\Delta Z}$	–0,01720	0,00044	1	–0,01064	–0,27871	1
	Марка «Медуза»					
m, м	0,0007	0,0007	0,0013	0,0006	0,0006	0,0011
$\lvert d \rvert > m$, %	16,78	16,30	21,15	18,01	16,07	20,76
$\lvert d \rvert > 2 \cdot m$, %	5,01	5,40	4,41	5,30	4,84	4,44
$\lvert d \rvert > 3 \cdot m$, %	1,85	2,18	1,77	1,77	1,94	2,03
A/E	–0,81/18,60	0,75/14,65	1,05/8,76	0,21/15,25	1,05/18,07	1,15/8,04
r_X	0,16003	0,05571	–0,00011	0,04860	–0,06406	–0,02235
r_Y	–0,14119	0,14241	–0,01006	0,06987	0,06185	0,01262
$r_{\Delta X}$	1	–0,09053	0,05353	1	–0,08606	0,01296
$r_{\Delta Y}$	–0,09053	1	–0,02262	–0,08606	1	–0,00559
$r_{\Delta Z}$	0,05353	–0,02262	1	0,01296	–0,00559	1

Таблица 3. Критерии качества сканирования для НЛС Trimble TX6 на расстояниях 0,6 и 2,2 м для трех типов объемных марок по координатным осям

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,6 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 1					
m, м	0,0012	0,0004	0,0024	0,0008	0,0003	0,0014
$\lvert d \rvert > m$, %	19,77	11,59	24,21	16,53	12,25	28,46
$\lvert d \rvert > 2 \cdot m$, %	7,69	2,04	6,48	7,53	1,83	6,57
$\lvert d \rvert > 3 \cdot m$, %	2,72	1,75	2,55	3,10	1,38	0,72
A/E	0,27/6,18	6,31/52,54	2,05/10,23	–0,14/7,62	–3,62/41,28	2,09/11,91
r_X	0,24158	–0,00971	0,08730	0,20291	–0,05570	0,08521
r_Y	0,01408	0,19902	–0,01131	0,04543	0,13097	–0,03039
$r_{\Delta X}$	1	–0,05237	–0,09051	1	0,02069	–0,05588
$r_{\Delta Y}$	–0,05237	1	0,08902	0,02069	1	–0,09409
$r_{\Delta Z}$	–0,09051	0,08902	1	–0,05588	–0,09409	1

Окончание табл. 3

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,5 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 2					
m, м	0,0012	0,0002	0,0023	0,0007	0,0002	0,0013
$\lvert d \rvert > m$, %	17,35	15,98	25,84	16,01	19,48	28,88
$\lvert d \rvert > 2 \cdot m$, %	7,38	2,34	6,72	8,19	2,07	6,27
$\lvert d \rvert > 3 \cdot m$, %	2,63	1,39	2,77	2,16	2,54	0,92
A/E	–0,26/7,43	–3,38/43,07	2,04/9,80	0,25/14,37	3,43/38,88	0,91/4,48
r_X	0,21351	–0,06545	0,12913	0,02580	0,01967	0,01839
r_Y	0,08045	0,13876	–0,02979	–0,03254	0,09550	0,00071
$r_{\Delta X}$	1	0,02452	–0,05628	1	0,03378	0,01643
$r_{\Delta Y}$	0,02452	1	–0,10318	0,03378	1	0,10080
$r_{\Delta Z}$	–0,05628	–0,10318	1	0,01643	0,10080	1
	Марка «Медуза»					
m, м	0,0008	0,0009	0,0020	0,0006	0,0006	0,0013
$\lvert d \rvert > m$, %	15,12	11,87	26,03	16,64	16,02	27,35
$\lvert d \rvert > 2 \cdot m$, %	5,49	4,35	5,45	6,13	6,14	5,30
$\lvert d \rvert > 3 \cdot m$, %	2,20	1,90	1,04	2,16	2,54	0,92
A/E	0,27/16,43	3,12/31,15	0,95/4,14	–0,11/15,78	1,17/12,17	0,40/2,29
r_X	0,01100	0,01986	0,02806	0,00786	–0,01132	0,00978
r_Y	–0,02913	0,10595	–0,01140	–0,05209	0,05440	0,03422
$r_{\Delta X}$	1	0,03843	0,02027	1	–0,03871	0,03303
$r_{\Delta Y}$	0,03843	1	0,10756	–0,03871	1	–0,08345
$r_{\Delta Z}$	0,02027	0,10756	1	0,03303	–0,08345	1

Третий набор данных получен для оценки повторяемости результатов, полученных при помощи предложенной методики. СКП критериев качества, рассчитанные по семи повторениям, составили от 1 до 14 % (рис. 3).

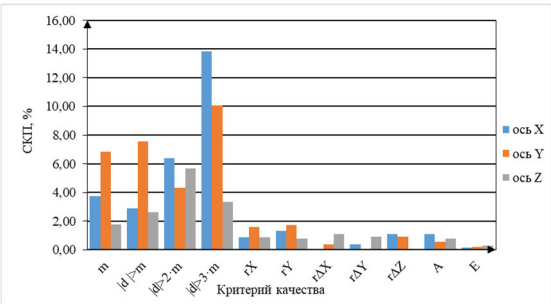


Рис. 3. График значений критериев качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстоянии 2,2 м для семи независимых повторений методики

Из приведенных данных в табл. 2 следует, что для качества сканирования НЛС Leica RTC360 характерно следующее:

– на дистанциях 0,5 и 2,2 м СКП для всех типов марок по осям X и Y находится в интервале от 0,2–1,1 мм, по оси Z – в интервале от 0,8–1,3 мм. Ухудшение точности по оси Z является ожидаемым и не превышает паспортных значений. В целом процентные доли на дистанциях 0,50 и 2,20 м различаются от 1 до 5 %, что свидетельствует о высокой повторяемости и стабильности измерений, а также о том, что качество сканирования не ухудшается при увеличении дистанции до 2,20 м в данных условиях. Наилучшую стабильность и близость к нормальному закону распределения демонстрирует марка «Медуза». Марки № 1 и 2 отличаются повышен-

ной долей выбросов, причем наиболее критично это проявляется по оси X при измерениях с близкой дистанции, что указывает на наличие систематических искажений, увеличение шума или появление грубых погрешностей;

– на обеих дистанциях для большинства коэффициентов корреляции значения не превышают 0,3, что по шкале Чеддока соответствует слабой степени связи. Это свидетельствует о наличии систематических погрешностей в отдельных областях облака ТЛО;

– значения асимметрии и эксцесса изменяются незначительно при переходе от 0,5 к 2,2 м, что подтверждает высокую стабильность измерений. Близкие к нулю значения асимметрии указывают на отсутствие систематических смещений. Для марок № 1 и 2 характерен высокий эксцесс до 30,5, что говорит об островершинном распределении с длинными хвостами. У марки «Медуза» эксцесс заметно ниже (8–18), а асимметрия не превышает 1,15, поэтому ее распределение более симметрично и приближено к нормальному.

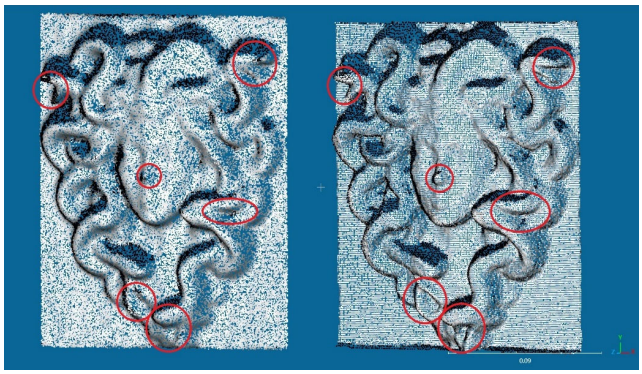
На основании табл. 3 можно охарактеризовать качество сканирования для НЛС Trimble TX6 следующим образом:

– с увеличением дистанции с 0,6 до 2,2 м значения СКП по оси Z значительно различаются для всех марок, но максимальное значение сопоставимо с паспортной точностью дальномера. В целом наблюдается тенденция к росту доли выбросов при увеличении дистанции. Это ожидаемо, так как с ростом дистанции увеличивается размер лазерного пятна и шум дальномера;

– на обеих дистанциях для большинства коэффициентов корреляции значения не превышают 0,3;

– при сравнении значений эксцесса и асимметрии на разных дистанциях выявлена выраженная нестабильность, особенно по оси Y. Так, эксцесс по Y для марки № 1 на 0,6 м достигает 52,54, а на 2,2 м снижается до 41,28, при этом остается крайне высоким. Асимметрия по Y также сильно варьируется от 1,17 до 6,31.

Наблюдаемые различия в значениях критериев качества могут быть соотнесены с визуально наблюдаемыми отличиями полученных облаков ТЛО (рис. 4).



а) *б*)

Рис. 4. Облако точек марки «Медуза», полученное на расстоянии 2,20 м с помощью двух НЛС: *а*) Leica RTC360; *б*) Trimble TX6

Облако точек, полученное с использованием Leica RTC360, выглядит более структурированным: на нем четко выделяются контуры тел и ротовые полости змей – они непрерывны и имеют резкие границы, что позволяет идентифицировать даже мелкие ответвления; отчетливо распознаются черты лица – оконтурены глазницы, прослеживается форма носа с переносицей и крыльями, видны линии губ и контур подбородка. В то же время облако от Trimble TX6 демонстрирует заметное сглаживание микротекстуры: тонкие линии становятся прерывистыми, края элементов размыты, черты лица теряют четкость, что приводит к потере детализации.

Сравнение показывает, что в целом Trimble TX6 уступает Leica RTC360 по большинству критериев, особенно по стабильности вдоль оси Z. СКП у Trimble TX6 выше по всем осям, особенно по Z для марки № 1 (в 2,2 раза на минимальной дистанции и в 1,75 на дистанции 2,2 м), что указывает на меньшую точность дальномера даже на короткой дистанции. Количество выбросов на минимальной дистанции и на дистанции 2,2 м (d_m, d_{2m}) у Trimble TX6 в основном превышает значения Leica RTC360 не более чем в 2 раза; для d_{3m} превышение достигает 4,1 раза на минимальной дистанции и 7,7 раза на дистанции 2,2 м. Наблюдается существенное увеличение эксцесса у Trimble TX6 по оси

Z в 4,3–5,7 раза, тогда как для остальных осей на минимальной дистанции различие составляет от 0,7 до 3,1 раза; на дистанции 2,2 м различия для всех осей не превышают 3 раз (за исключением аномального случая по оси Y для марки № 1, где отношение достигает 46,9). На всех дистанциях у Trimble TX6 асимметрия отличается от Leica RTC360 в пределах до 3,3 раза, что говорит о значительном смещении распределения ошибок и является критичным для подобных объектов.

Заключение

В рамках исследования была разработана и апробирована методика оценки качества наземного лазерного сканирования высокодетализированных поверхностей. По результатам апробации методики могут быть сделаны следующие выводы:

– методика позволяет количественно оценить различия в качестве данных НЛС, которые визуально наблюдаются при анализе облаков ТЛО;

– методика обеспечивает воспроизводимый результат. Большая часть параметров варьируется от подхода к подходу с СКП не более 2 %, а остальные – с СКП не более 14 %. Наибольший разброс наблюдается для d_{3m}, что является закономерным и объясняется физической сущностью данного критерия, характеризующего редко встречающиеся грубые погрешности;

– качество облаков ТЛО при сканировании поверхностей с мелкой детализацией может существенно отличаться для НЛС с близкими техническими характеристиками (Leica RTC360 и Trimble TX6).

Разработанная методика может использоваться для сравнения моделей специализированных сканеров (Konica Minolta VI-9i, Z+F FlexScan 22), сканирующих тахеометров (Trimble SX10), сканирующих трекеров (Leica Absolute Tracker ATS600) и обоснования их выбора для решения конкретных геодезических задач, оценки технического состояния конкретных образцов НЛС, исследования влияния внешних условий на качество сканирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Piekarczuk A., Mazurek A., Szer J., Szer I. A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique. Buildings. 2024. Vol. 14. P. 3703. DOI 10.3390/buildings14123703.

2. Новоселов Д. Б. Применение наземных лазерных сканеров при геодезическом сопровождении строительства горнодобывающих промышленных предприятий. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». Новосибирск : СГУГиТ, 2022. С. 104–112. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-104-112.

3. Siwiec J., Lenda G. Integration of terrestrial laser scanning and structure from motion for the assessment of industrial chimney geometry. Measurement. 2022. Vol. 199. P. 1–12. DOI 10.1016/j.measurement.2022.111404.

4. Liu S, Bin Mamat M. J. Application of 3D laser scanning technology for mapping and accuracy assessment of the point cloud model for the Great Achievement Palace heritage building. Heritage Science. 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI 10.1186/s40494-024-01252-y.

5. Milosz M., Kesik J., Abdullaev U. 3D scanning and modeling of highly detailed and geometrically complex historical architectural objects: the example of the Juma Mosque in Khiva (Uzbekistan). Heritage Science. 2024. Vol. 12. P. 1–14. DOI 10.1186/s40494-024-01207-3.

6. Bent G., Pfaff D., Brooks M., Radpour R., Delaney J. A practical workflow for the 3D reconstruction of complex historic sites and their decorative interiors: Florence As It Was and the church of Orsanmichele. Heritage Science. 2022. Vol. 10. P. 1–17. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.

7. Кучинская Г., Ставская М. Применение наземного лазерного сканирования в современных условиях. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. Т. 1. С. 160–169. DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-160-169.

8. Kuznetsova I., Kuznetsova D., Rakova X. The Use of Surface Laser Scanning for Creation of a ThreeDimensional Digital Model of Monument. Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 1625-1633. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.

9. Барышев А. И., Кузнецов Т. И., Покровская Е. А. Применение лазерного сканирования для определения напряженно-деформированного состояния трубных секций и интерпретации дефектов геометрии. Нефтяное хозяйство. 2022. Т. 12. С. 144–148. DOI 10.24887/0028-2448-2025-12-144-148.

10. Долгополов Д. В., Кузнецов Т. И., Ахундов А. Г., Барышев А. И., Мелкий В. А. Построение трехмерных моделей объектов магистрального трубопровода по данным лазерного сканирования для формирования границы отвода земель. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 4. С. 117–130. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130.

11. Adami A., Guerra F., Vernier P. Laser scanner and architectural accuracy text. XXI International CIPA Symposium. 2007. P. 7–11.

12. Liu J., Zhang Q., Wu J., Zhao Y. Dimensional accuracy and structural performance assessment of spatial structure components using 3D laser scanning. Automation in Construction. 2018. Vol. 96. P. 324–336. DOI 10.1016/j.autcon.2018.09.026.

13. Antova G. Evaluation of Factors, Influencing the Accuracy of the Digital Model, Obtained by Laser Scanning. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 362. P. 12129–12137. DOI 10.1088/1755-1315/362/1/012129.

14. Комиссаров А. В. Классификация погрешностей в результатах лазерного сканирования. Геодезия и картография. 2015. Т. 10. С. 13–18. DOI 10.22389/0016-7126-2015-904-10-13-18.

15. Abiola D., Che E., Olsen M. Data-driven and scale-variant 3D accuracy assessment of terrestrial laser scanning data. Measurement. 2026. Vol. 275. P. 121254. DOI 10.1016/j.measurement.2026.121254.

16. Pawlowicz J. Effect of geometrical features various objects on the data quality obtained with measured by TLS. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 227. P. 012093. DOI 10.1088/1757-899X/227/1/012093.

17. Razali M. H., Idris A. N., Nor T. N. A. T. M., Ghazali R. Accuracy Assessment On Point Cloud Dataset from Terrestrial Laser Scanner with Different Objects Surface Properties. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 767. P. 012007. DOI 10.1088/1755-1315/767/1/012007.

18. Голубев В. В. Геодезия. Теория математической обработки геодезических измерений : учебник для вузов. М. : Изд-во МИИГАиК, 2016. 422 с.

REFERENCES

1. Piekarczuk A., Mazurek A., Szer J., Szer I. (2024). A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique. *Buildings*, 14. DOI 10.3390/buildings14123703.

2. Novoselov D. B. (2022). The use of laser scanners in geodetic support of the construction of mining industrial enterprises. *Interexpo GEO-Siberia*. *[Interexpo GEO-Siberia]*, 1, 104-112. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-104-112 [in Russian].

3. Siwiec J., Lenda G. (2022). Integration of terrestrial laser scanning and structure from motion for the assessment of industrial chimney geometry. *Measurement*, 199. DOI 10.1016/j.measurement.2022.111404.

4. Liu S., Bin Mamat M. J. (2024). Application of 3D laser scanning technology for mapping and accuracy assessment of the point cloud model for the Great Achievement Palace heritage building. *Heritage Science*, 12. DOI 10.1186/s40494-024-01252-y.

5. Milosz M., Kesik J., Abdullaev U. (2024). 3D scanning and modeling of highly detailed and geometrically complex historical architectural objects: the example of the Juma Mosque in Khiva (Uzbekistan). *Heritage Science*, 12. DOI 10.1186/s40494-024-01207-3.

6. Bent G., Pfaff D., Brooks M., Radpour R., Delaney J. (2022). A practical workflow for the 3D reconstruction of complex historic sites and their decorative interiors: Florence As It Was and the church of Orsanmichele. *Heritage Science*, 10. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.

7. Kuchinskaya G., Stavskaya M. (2021). Modern applications of terrestrial laser scanning. *Mining informational and analytical bulletin [Mining informational and analytical bulletin]*, 1, 160-169. DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-160-169 [in Russian].

8. Kuznetsova I., Kuznetsova D., Rakova X. (2015). The Use of Surface Laser Scanning for Creation of a ThreeDimensional Digital Model of Monument. *Procedia Engineering*, 100, 1625-1633. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.

9. Baryshev A. I., Kuznetsov T. I., Pokrovskaya E.A. (2022). Application of laser scanning to determine the stress-strain state of pipe sections and interpret geometry defects. *Oil Industry* [*Oil Industry*], 12, 144–148. DOI 10.24887/0028-2448-2025-12-144-148 [in Russian].

10. Dolgopolov D. V., Kuznetsov T. I., Akhundov A. G., Baryshev A. I., Melkiy V. A. (2025). Three-dimensional geoinformation modeling of main pipeline facilities by laser scanning data to form the boundary of the allotment of land. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4 (30), 117–130. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130 [in Russian].

11. Adami A., Guerra F., Vernier P. (2007). Laser scanner and architectural accuracy text. *XXI International CIPA Symposium*. Athens.

12. Liu J., Zhang Q., Wu J., Zhao Y. (2018). Dimensional accuracy and structural performance assessment of spatial structure components using 3D laser scanning. *Automation in Construction*, 96, 324–336. DOI 10.1016/j.autcon.2018.09.026.

13. Antova G. (2019). Evaluation of Factors, Influencing the Accuracy of the Digital Model, Obtained by Laser Scanning. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 362. DOI 10.1088/1755-1315/362/1/012129.

14. Komissarov A. V. (2015). The classification errors in the results of the laser scanning. Geodesy and cartography [*Geodesy and cartography*], 10, 13–18. DOI 10.22389/0016-7126-2015-904-10-13-18 [in Russian].

15. Abiola D., Che E., Olsen M. (2026). Data-driven and scale-variant 3D accuracy assessment of terrestrial laser scanning data. *Measurement*, 275. DOI 10.1016/j.measurement.2026.121254.

16. Pawlowicz J. (2017). Effect of geometrical features various objects on the data quality obtained with measured by TLS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 227. DOI 10.1088/1757-899X/227/1/012093.

17. Razali M. H., Idris A. N., Nor T. N. A. T. M., Ghazali R. (2021). Accuracy Assessment On Point Cloud Dataset from Terrestrial Laser Scanner with Different Objects Surface Properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *767*. DOI 10.1088/1755-1315/767/1/012007.

18. Golubev V. V. (2016). Geodeziya. *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy [The theoretical framework].* Moscow: MIIGAIK, 422 p. [in Russian].

Об авторах

Андрей Олегович Куприянов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной геодезии.

Дмитрий Андреевич Морозов – старший преподаватель кафедры прикладной геодезии.

Дарья Сергеевна Мелихова – преподаватель кафедры прикладной геодезии, аспирант кафедры прикладной геодезии.

Павел Вячеславович Молоков – преподаватель кафедры прикладной геодезии.

Author details

Andrey O. Kupriyanov – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Applied Geodesy.

Dmitry A. Morozov – Senior Lecturer, Department of Applied Geodesy.

Darya S. Melikhova – Lecturer, PhD Student, Department of Applied Geodesy.

Pavel V. Molokov – Lecturer, Department of Applied Geodesy.

Получено / Received 19.08.2026
Поступила после рецензирования / Revised 31.08.2026
Принята к публикации / Accepted 09.09.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 528.48:004.738.5
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-45-52

Оценка возможности использования смартфонов в качестве геодезического оборудования для определения геометрических параметров строительных конструкций

В. Г. Сальников[1]✉, А. М. Астапов[1], С. Р. Горобцов[1], Г. Д. Геращенко[1]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: salnikov@ssga.ru

Аннотация. Актуальность выполненного исследования обусловлена необходимостью в снижении трудоемкости выполнения геодезического контроля за геометрическими параметрами строительных конструкций при обеспечении требуемой точности измерений их определения. Предметом исследования явилось определение возможности применения смартфона Apple iPhone 15 Pro Max в качестве геодезического оборудования для контроля геометрических параметров строительных конструкций. Методика исследования заключалась в выполнении координирования строительной конструкции тахеометром Leica TS 02 (2"), результаты которого были приняты за эталонные значения, с которыми в дальнейшем сравнивались результаты, полученные двумя методами с использованием смартфона: LiDAR-сканированием через приложение 3D Scanner App и фотограмметрической обработкой серии снимков 48-мегапиксельной камеры в ПО Agisoft Metashape. В результате выполненных исследований было установлено, что в существующем виде применение смартфонов не выявило возможность их использования при контрольном определении геометрических параметров для данного типа строительной конструкции. Предложены области возможного применения смартфонов, которые заключаются в определении типов строительных конструкций, их размеров и максимального удаления смартфона от контролируемого объекта, при которых точность определения параметров соответствует нормативной.

Ключевые слова: исполнительная съемка, геометрические параметры, смартфон, LiDAR, фотограмметрия, тахеометр, строительные конструкции, нормативная точность, средняя квадратическая ошибка

Для цитирования:
Сальников В. Г., Астапов А. М., Горобцов С. Р., Геращенко Г. Д. Оценка возможности использования смартфонов в качестве геодезического оборудования для определения геометрических параметров строительных конструкций. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 45–52. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-45-52

Evaluating the feasibility of smartphone-based geodetic surveying for determining geometric parameters of building structures

V. G. Salnikov[1]✉, A. M. Astapov[1], S. R. Gorobtsov[1], G. D. Gerashenko[1]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: salnikov@ssga.ru

© В. Г. Сальников, А. М. Астапов, С. Р. Горобцов, Г. Д. Геращенко, 2026

Abstract. The relevance of the study is motivated by the need to reduce costs associated with geodetic monitoring of building structures while maintaining acceptable measurement accuracy. The objective of the research is to evaluate the feasibility of employing an Apple iPhone 15 Pro Max smartphone as geodetic equipment for determining the geometric parameters of building structures. The methodology comprised control surveying using a Leica TS 02 (2") electronic total station, adopted as the reference standard, and two smartphone-based surveying approaches: LiDAR scanning via the 3D Scanner App and photogrammetric processing of image sequences captured with the 48-megapixel camera using Agisoft Metashape software. Comparative analysis was conducted across multiple linear dimensions of a staircase porch structure. Results indicate that deviations obtained using the LiDAR method substantially exceeded permissible tolerances. Photogrammetric processing yielded considerably smaller deviations; for the shortest measured line, the deviation remained within acceptable limits, whereas for the remaining lines, deviations exceeded the permissible threshold. The findings demonstrate that smartphones in their current configuration cannot substitute for professional geodetic equipment but may serve as auxiliary tools for rapid preliminary inspection and quality control.

Keywords: as-built surveying, geometric parameters, smartphone, LiDAR, photogrammetry, total station, building structures, measurement accuracy

For citation:
Salnikov V. G., Astapov A. M., Gorobtsov S. R., Gerashenko G. D. (2026). Evaluating the feasibility of smartphone-based geodetic surveying for determining geometric parameters of building structures. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 45–52. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-45-52

Введение

Развитие современных технологий открывает новые возможности для повышения эффективности и снижения затрат при выполнении геодезического сопровождения строительства. Одной из ключевых задач на этапах строительно-монтажных работ является контроль соответствия возводимых конструкций проектным параметрам. Традиционно для исполнительной съемки строительных конструкций применяется геодезическое оборудование: тахеометры, наземные лазерные сканеры, нивелиры, ГНСС-приемники, ручные SLAM-системы и другие высокоточные приборы [1, 2]. Их использование связано со значительными финансовыми затратами и необходимостью специальной подготовки персонала.

В последние годы наблюдается активное использование в смартфонах технологий, ранее применяемых только в специализированных геодезических приборах. В частности, распространение в смартфонах датчиков LiDAR (Light Detection and Ranging) [3] и существенное улучшение качества камер позволяет применять технологии дополненной реальности [4].

Главное предназначение датчика LiDAR – улучшение качества цифровых фотографий в условиях недостаточной освещенности. Необходимо отметить, что с помощью специализированных мобильных приложений для смартфонов (на базе мобильных операционных систем iOS и Android), например, 3D Scanner App, Polycam, Modelar [5–9] и др., имеется возможность использовать результаты работы датчика LiDAR для формирования облака точек снимаемых объектов. В результате появляется возможность использовать потенциал смартфонов в качестве альтернативных инструментов для выполнения отдельных технологических операций, например, для определения геометрических параметров конструкций или обмеров помещений в целях государственного кадастрового учета [10]. Для такого варианта использование смартфона в качестве мобильного сред-

ства определения геометрических параметров позволит значительно снизить трудоемкость оперативного контроля строящихся зданий и сооружений.

В соответствии с изложенным выше целью работы является рассмотрение возможности применения смартфона в качестве геодезического оборудования для определения геометрических параметров строительных конструкций.

Методы и материалы

В качестве строительной конструкции объектом исследования было выбрано крыльцо главного входа в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (рис. 1).

Рис. 1. Общий вид строительной конструкции (крыльцо СГУГиТ)

Экспериментальные исследования выполнялись с применением следующего комплекса технических и программных средств:

– электронный тахеометр Leica TS 02 с мини-призмой Leica;

– смартфон Apple iPhone 15 Pro Max, оснащенный основным датчиком камеры 48 мегапикселей (Мп) и встроенным датчиком LiDAR;

– для обработки результатов измерений – nanoCAD, GeoniCS;

– для выполнения сканирования и обработки результатов, полученных с использованием датчика LiDAR, – мобильное приложение 3D Scanner App;

– для фотограмметрической обработки цифровых снимков – профессиональное ПО Agisoft Metashape;

– для обработки результатов сканирования – Leica Cyclone.

В качестве эталонных значений использовались геометрические параметры строительной конструкции, полученные с использованием тахеометра. В качестве проверяемого оборудования использовался смартфон Apple iPhone 15 Pro Max, с основной 48-мегапиксельной камерой и встроенным датчиком LiDAR.

Контрольная исполнительная съемка выполнена в условной системе координат с одной станции, по всем характерным (габаритным) точкам конструкции крыльца. Результаты измерений тахеометром были импортированы в формат .dxf и обработаны с помощью ПО nanoCAD GeoniCS (рис. 2).

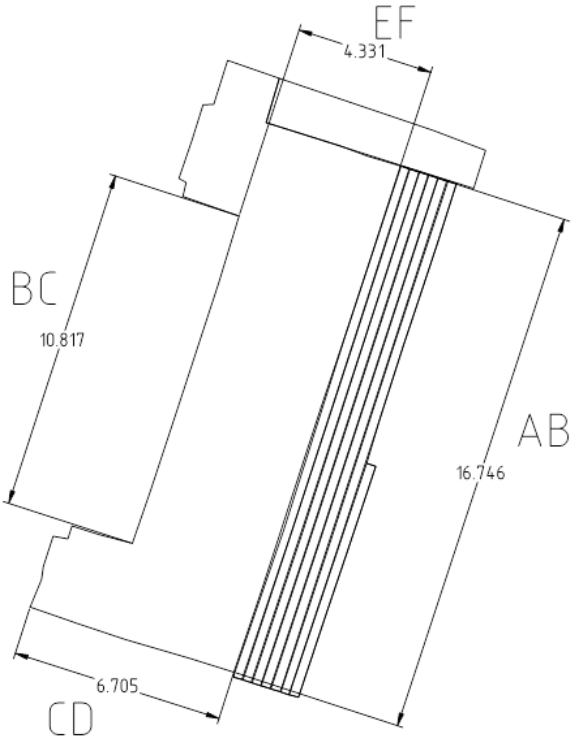


Рис. 2. Результаты исполнительной съемки крыльца СГУГиТ, полученные в ПО nanoCAD GeoniCS

Значения эталонных длин линий (AB, BC, CD и EF), которые приведены в таблице, были вычислены по координатам характерных точек строительной конструкции из решения обратной геодезической задачи.

Дальнейшие исследования заключались в применении и анализе двух методов испол-

нительной съемки с использованием смартфона iPhone 15 Pro Max:

1) при помощи датчика LiDAR;

2) при помощи неметрической 48-мегапиксельной камеры.

Сканирование смартфоном с помощью LiDAR велось в мобильном ПО 3D Scanner App без его стабилизации в пространстве, при максимальном расстоянии до объекта исследования не более пяти метров. При этом качество исполнительной съемки в приложении было определено как высокое.

Предварительный результат сканирования объекта исследования приведен на рис. 3.

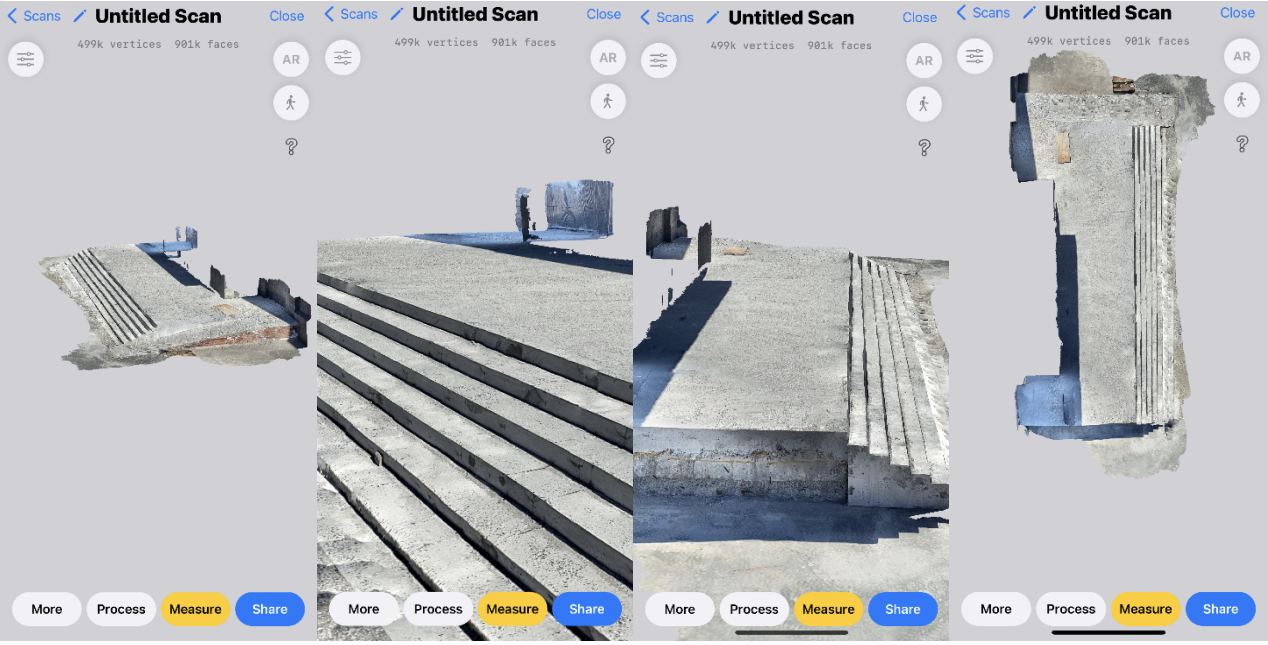


Рис. 3. Облако точек, полученное в ПО 3D Scanner App

После обработки на смартфоне полученное облако точек было экспортировано в ПО Leica Cyclone (рис. 4), где было выполнено измерение контрольных линий между характерными точками строительной конструкции (AB, BC, CD и EF), которые также приведены в таблице.

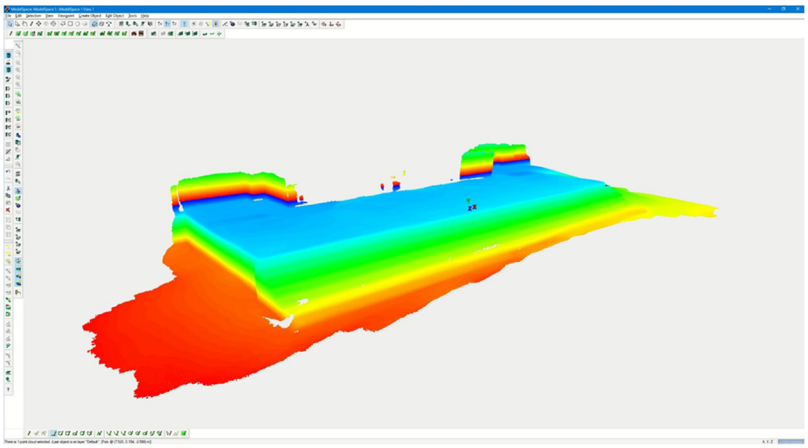


Рис. 4. Облако точек строительной конструкции, полученное в ПО Leica Cyclone

Применение второго метода исполнительной съемки заключалось в использовании неметрической 48-мегапиксельной камеры, установленной на этом же смартфоне iPhone

15 Pro Max. В результате было получено 164 снимка, фотограмметрическая обработка которых осуществлялась по стандартной методике в специализированном ПО Agisoft Metashape. Полученное облако точек импортировалось в ПО Leica Cyclone, где также было выполнено измерение контрольных длин линий AB, BC, CD и EF (см. таблицу).

Результаты

Результаты выполненных геодезических измерений представлены в таблице.

Расхождение между измеренными контрольными длинами линий и эталонными значениями

Название контрольных линии	Значение контрольных длин линий			Отклонение от эталонных значений	
	Эталонные, м	Метод 1, м	Метод 2 м	Δ_1, м	Δ_2, м
AB	16,746	16,923	16,647	0,177	–0,099
BC	10,817	10,935	10,726	0,118	–0,091
CD	6,705	6,776	6,684	0,071	–0,021
EF	4,331	4,363	4,326	0,032	–0,005
Средняя квадратическая ошибка, вычисленная по формуле Гаусса				0,113	0,068
Нормативное значение средней квадратической ошибки, установленной для данного типа строительной конструкции				0,007	

Для корректного анализа полученных результатов необходимо установить предельно допустимое расхождение, соответствующее данному классу строительной конструкции. В соответствии с действующей нормативно-правовой базой (СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25.12.2012 № 109/ГС. – URL: https://www.consultant.ru/. – Текст: электронный), для такого типа строительной конструкции предельно допустимое отклонение соответствия длины и ширины $\Delta_{пред}$ составляет ±20 мм. Следовательно, допустимая средняя квадратическая ошибка (СКО) используемого метода геодезических измерений в соответствии с уравнением будет составлять 7 мм:

$$m_{доп} = \frac{\Delta_{пред}}{t} = \frac{20\,мм}{3} = 7\,мм, \qquad (1)$$

где t – статистический коэффициент перехода от предельного значения к средней квадратической ошибке, принимаемый при доверительной вероятности β = 0,9973 равным t = 3.

СКО исследуемых методов исполнительных съемок вычислялась по формуле Гаусса с использованием следующего уравнения:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} \Delta^2}{n}} \le m_{доп}, \qquad (2)$$

где n – число контрольных длин линий;

Δ – полученные расхождения между эталонным и измеренным значением контрольной длины линии.

Анализируя результаты исследования, приведенные в таблице, следует сделать следующие выводы.

1. Применение первого метода геодезических измерений, заключающегося в использовании встроенного датчика LiDAR в смартфон, привело к неудовлетворительным результатам, намного превышающим требуемую точность определения параметров строительной конструкции. Средняя квадратическая ошибка данного метода составила m = 113 мм, при допуске $m_{доп}$ = 7 мм.

2. Применение второго метода геодезических измерений, заключающегося в использовании неметрической 48-мегапиксельной камеры смартфона, привело также к неудовлетворительным результатам, не соответствующим установленным для данной строитель-

ной конструкции точностным требованиям – средняя квадратическая ошибка данного метода составила m = 68 мм.

3. Полученные точностные характеристики соответствуют ситуации, при которой смартфон удален от строительной конструкции на максимальное расстояние не более пяти метров.

4. Установлена зависимость между размерами контролируемых элементов строительной конструкции и значением отклонения параметров от своих эталонных значений.

Заключение

Проведенное в настоящей статье экспериментальное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы.

1. Применение двух методов исполнительной съемки для данного типа строительной конструкции не выявили возможность использования смартфона со встроенным датчиком LiDAR и наличием неметрической 48-мегапиксельной камеры в качестве геодезического средства измерения. Средняя квадратическая ошибка каждого из двух методов намного превышает требуемую точность определения параметров строительной конструкции.

2. Использование этих методов как вспомогательного инструмента целесообразно для актуализации результатов исполнительной съемки, выполненной с использованием традиционных геодезических методов (тахеометр) и строительных конструкций, требующих меньшую точность определения их геометрических параметров.

3. Повышение точности определения геометрических параметров при использовании смартфонов с соответствующими приложениями заключается в увеличении количества контролируемых характерных точек, позволяющих разделить строительную конструкцию на фрагменты, использовать устройство для стабилизации, устанавливать максимально допустимые размеры контролируемого объекта и расстояние от него до смартфона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

2. Андрюшенков А. Ф., Воловник Н. С., Андрюшенков А. А. Безопасность зданий и сооружений: геодезический контроль строительства зданий и сооружений : учебно-методическое пособие для практических работ. Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2018. 131 с.

3. Алтынцев М. А. Применение технологии наземного лазерного сканирования для создания обмерных чертежей фасадов зданий. Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 3. С. 5–18. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-5-18. EDN WLAGIJ.

4. Wang Sh., Kornienko A., Dzerkachenka P. 3D scanning applications. Education and Science in the development of Technology, Economy and Society. 2025. Pp. 354–355. EDN LJBZBV.

5. Сальников В. Г., Горобцов С. Р. Применение дополненной реальности при визуализации готовых инженерных решений. Российский форум изыскателей : сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. Москва, 2022. С. 107–110. EDN BEHFTN.

6. Rizali M. I., Idris A. N., Rizali M. H., Syafuan W. M. Quality Assessment of 3D Point Clouds on the Different Surface Materials Generated from iPhone LiDAR Sensor. Geospatial Technologies Tackling Global Challenges. 2022. Vol. 18, № 4. Pp. 51–58. DOI 10.52939/ijg.v18i4.2259.

7. Сальников В. Г., Горобцов С. Р., Астапов А. М., Кирилов Н. А. Применение современных смартфонов с функцией LiDAR для топографической съемки масштаба 1 : 500 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 1. С. 119–125. DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-119-125. EDN MWDRGW.

8. Gregor Luetzenburg, Aart Kroon, Anders Anker Bjørk. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. Scientific Reports. 2021. Vol. 11. DOI 10.1038/s41598-021-01763-9.

9. Сапронов А. Е., Усманова А. Д. Применение технологии «LiDAR» смартфонов и планшетов при создании трехмерных моделей. Техника и технология транспорта. 2023. № 2 (29). С. 19. EDN WLEEWS.

10. Гусев А. Н., Насереддин Х. Х. Создание геодезической разбивочной основы с помощью LiDAR-сканера, установленного в смартфоне iPhone 16 Pro Max. Инженерные изыскания. 2024. Т. XVIII, № 1. С. 66–76. DOI 10.25296/1997-8650-2024-18-1-66-76. EDN UVALFM.

11. Суранов Н. А., Романчиков А. Ю., Вальков В. А. Исследование применения лидаров в смартфоне iPhone 12 Pro при выполнении обмеров помещений для целей государственного кадастрового учета. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 3. С. 33–46. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-33-46. EDN: EPJFYA.

12. Higinio González-Jorge, Joaquin Martínez-Sánchez, Martín Bueno, Pedor Arias. Unmanned Aerial Systems for Civil Applications: A Review. Drones. 2017. Vol. 1, № 1. DOI 10.3390/drones1010002.

REFERENCES

1. Andryushenkov, A. F., Volovnik, N. S., Andryushenkov A. A. (2018). *Bezopasnost zdanij i sooruzhenij geodezicheskij kontrol stroitelstva zdanij i sooruzhenij: uchebno metodicheskoe posobie dlya prakticheskih rabot [Safety of Buildings and Structures: Geodetic Control of Building and Structure Construction: A Practical Study Guide for Professionals].* Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) Publ., 131 p. [in Russian].

2. Altyntsev, M. A. (2022). Application of terrestrial laser scanning technology for creating record drawings of building facades. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(3), 5–18. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-5-18.1. EDN WLAGIJ [in Russian].

3. Wang, Sh., Kornienko, A., Dzerkachenka, P. (2025). 3D Scanning Applications. *Education and Science in the development of Technology, Economy and Society*. P. 354–355. EDN LJBZBV.

4. Salnikov, V. G. & Gorobtsov, S. R. (2022). The use of augmented reality in the visualization of ready-made engineering solutions. In *Rossijskij forum izyskatelej. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Russian forum of surveyors. Collection of reports of the IV International Scientific and Practical Conference]*, 107–110. EDN BEHFTN [in Russian].

5. Rizali, M. I., Idris, A. N., Rizali, M. H., Syafuan, W. M. (2022). Quality Assessment of 3D Point Clouds on the Different Surface Materials Generated from iPhone LiDAR Sensor. *Geospatial Technologies Tackling Global Challenges*, 18(4), 51–58. DOI 10.52939/ijg.v18i4.2259.

6. Salnikov, V. G., Gorobtsov, S. R., Astapov, A. M., Kirilov, N. A. (2023). The use of modern smartphones with the LiDAR function for topographic survey at a scale of 1 : 500. *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*, 1, 119–125. DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-119-125. EDN MWDRGW [in Russian].

7. Gregor Luetzenburg, Aart Kroon, Anders Anker Bjørk. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports*, 11. DOI 10.1038/s41598-021-01763-9.

8. Sapronov, A. E. & Usmanova A. D. (2023). The use of LiDAR technology of smartphones and tablets when creating three-dimensional models. *Tekhnika i tekhnologiya transporta [Technique and Technology of Transport]*, 2(29), 19 p. EDN WLEEWS [in Russian].

9. Gusev, A. N. & Nasereddin, H. H. (2024). Creating a Geodetic Center Base Using a LiDAR Scanner Installed in an iPhone 16 Pro Max Smartphone. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering survey]*, 18(1), 66–76. DOI 10.25296/1997-8650-2024-18-1-66-76. EDN UVALFM [in Russian].

10. Suranov, N. A., Romanchikov, A. Yu., Valkov, V. A. (2023). The Examination of a Possibility for Usage of an iPhone 12 Pro LiDAR to Indoor Measurements for State Cadastral Registration. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(3), 33–46. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-33-46. EDN EPJFYA [in Russian].

11. Higinio González-Jorge, Joaquin Martínez-Sánchez, Martín Bueno, Pedor Arias. (2017). Unmanned Aerial Systems for Civil Applications: A Review. *Drones*, 1(1). DOI 10.3390/drones1010002.

Об авторах

Валерий Геннадьевич Сальников – кандидат технических наук, доцент, декан факультета геодезии, картографии и горного дела.

Андрей Михайлович Астапов – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геодезии и горного дела.

Сергей Романович Горобцов – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геодезии и горного дела.

Глеб Денисович Геращенко – аспирант кафедры прикладной геодезии и горного дела.

Author details

Valeriy G. Salnikov – PhD, Associate Professor, Dean, Faculty of Geodesy, Cartography and Mining.

Andrej M. Astapov – PhD, Senior Lecturer, Department of Applied Geodesy and Mining.

Sergey R. Gorobtsov – PhD, Associate Professor, Department of Applied Geodesy and Mining.

Gleb D. Gerashenko – PhD Student, Department of Applied Geodesy and Mining.

Получено / Received 30.04.2026
Поступила после рецензирования / Revised 07.09.2026
Принята к публикации / Accepted 23.09.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 528.721.221.6
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-53-63

Методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации

Н. И. Хушт[1]✉, М. Я. Брынь[2]

[1] АО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: nafset-khusht@yandex.ru

Аннотация. В ходе решения задачи по совершенствованию методов обработки данных лазерного сканирования предложена методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации. Необходимость прореживания облаков точек в первую очередь продиктована проблемой по ускорению процессов обработки больших массивов данных без существенной потери информативности. Предложена формула из ГОСТ Р 70690-2023 (ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги». – URL: https://docs.cntd.ru. – Текст: электронный) для расчета минимального допустимого количества точек лазерного отражения после прореживания. Разработана и написана программа на языке программирования Python по выделению сегментов в исходном облаке точек и автоматизированному расчету размера вокселя воксельной решетки для каждого из выделенных сегментов. Произведено сравнение результирующего количества точек в облаке точек после прореживания с минимальным допустимым количеством точек лазерного отражения на 1 м^2 для съемки масштаба 1 : 500 равнинного участка местности с высотой сечения рельефа 0,5 м, а также рассчитан процент прореживания.

Ключевые слова: облако точек, воздушное лазерное сканирование, вокселизация, сегментация, воксельная решетка, воксель, прореживание, трехмерная модель

Для цитирования:
Хушт Н. И., Брынь М. Я. Методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 53–63. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-53-63

An integrated voxelization-segmentation framework for adaptive thinning of airborne LiDAR point clouds

N. I. Khusht[1]✉, M. Ya. Bryn[2]

[1]Polymetal Engineering JSC, St. Petersburg, Russian Federation
[2]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: nafset-khusht@yandex.ru

© Н. И. Хушт, М. Я. Брынь, 2026

Abstract. The authors present a methodology for thinning airborne laser scanning point clouds by integrating voxelization and segmentation techniques to enhance the efficiency of large-scale geospatial data processing. The proposed approach addresses the critical challenge of reducing computational load while maintaining the informational integrity of point cloud datasets. The minimum permissible point density after thinning was established in accordance with GOST R 70690-2023 ("Public Highways. Laser Scanning. Requirements for Laser Scanning Data at Various Stages of the Life Cycle of a Public Highway"). A Python-based software tool was developed to perform automated segmentation of the original point cloud and to calculate optimal voxel sizes for each identified segment. The effectiveness of the methodology was evaluated by comparing the resulting point density against the minimum required density for topographic surveying at a scale of 1:500 over flat terrain with a 0.5 m contour interval.

Keywords: point cloud, airborne laser scanning, voxelization, segmentation, voxel grid, voxel, downsampling, 3D model

For citation:
Khusht N. I., Bryn M. Ya. (2026). An integrated voxelization-segmentation framework for adaptive thinning of airborne LiDAR point clouds. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 53–63. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-53-63

Введение

С ростом темпов строительства промышленных и гражданских объектов в рамках комплексного и устойчивого развития территорий и повышения требований к качеству исходных данных для проектирования, в том числе для создания моделей местности, рельефа и различных объектов, возникает задача по совершенствованию оперативных и обеспечивающих необходимую точность методов съемки.

Одним из таких методов является лазерное сканирование, суть которого заключается в фиксации лазерным лучом форм физических объектов и их представлении в виде облаков точек с высокой плотностью. При этом выделяют три основных вида лазерного сканирования: воздушное, наземное и мобильное [1–15]. Каждый из перечисленных видов лазерного сканирования обладает своими преимуществами и недостатками, однако при необходимости получения оперативных и точных данных об объектах на больших площадях наиболее целесообразно использовать воздушное лазерное сканирование [1–8].

Вместе с тем, массивы облаков точек, получаемых посредством воздушного лазерного сканирования, объем которых велик, требуют последующей тщательной обработки, от качества проведения которой зависит точность формируемой на основе этих точек моделей местности, рельефа и объектов. В качестве первостепенной проблемы обработки такого типа данных выступает их избыточность для большинства программных комплексов, что увеличивает время обработки данных и требует уменьшения количества точек в облаках без существенной потери информативности и сохранения при этом основных характеристик объектов съемки [1–2, 16].

Методы и материалы

Для ускорения процесса обработки предлагаются различные методы прореживания облаков точек лазерного сканирования, такие как метод ближайших соседей, метод итеративного упрощения, метод вокселизации и др. [3–8].

Основным недостатком метода ближайших соседей является потеря информативности на участках облаков с малой плотностью распределения точек ввиду постоянного фактора прореживания (в случае метода ближайших соседей это границы окрестности поиска ближайших соседей-точек), причиной которого является неоднородность облаков точек по плотности.

Этот недостаток также характерен и для метода вокселизации, широко используемом в области системного анализа для упрощения

работы с точками путем замены облачной трехмерной модели объекта на упрощенную трехмерную модель, которая строится на основе замещающих укрупненных кубиков – вокселей [3]. Так, данный метод, согласно проведенным исследованиям зарубежных ученых Biao Xiong, Weize Jiang, Dengke Li и Man Qi из Уханьского технологического университета и Педагогического университета Центрального Китая и N. Stelling, K. Richter из Дрезденского технического университета, эффективен для упрощения облачной трехмерной модели при работе с моделями зданий и сооружений, состоящими только из простых конструктивных элементов (рис. 1) [3, 9].

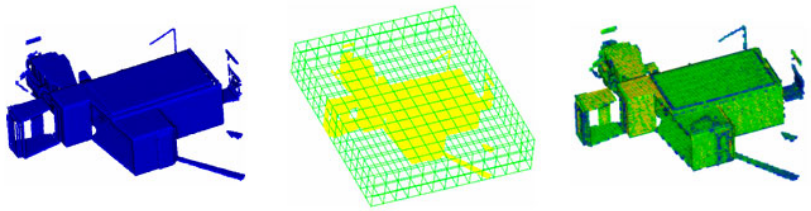


Рис. 1. Вокселизация облака точек здания с простыми конструктивными элементами

Для рельефа и зданий, обладающих сложными архитектурными элементами (барельефы, выступающие части и т. д.), в процессе вокселизации возникает обозначенная выше проблема потери информативности при уменьшении объема обрабатываемых трехмерных данных, в результате чего итоговая модель представляет собой сильно упрощенную версию исходного объекта (рис. 2) [9].

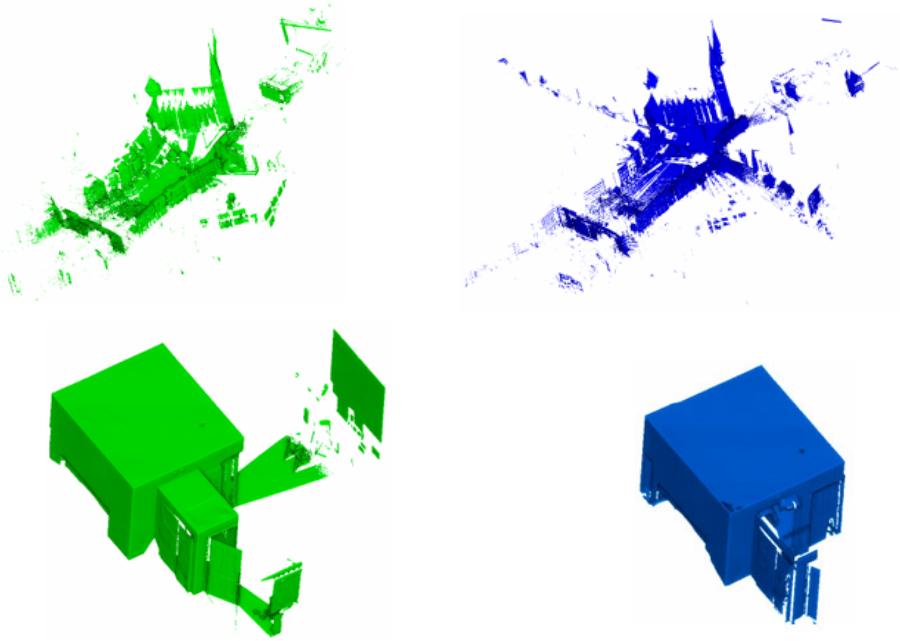


Рис. 2. Результаты вокселизация облака точек здания с сложными конструктивными элементами

Для устранения отмеченного недостатка предлагается усовершенствовать метод вокселизации и применять его не для замены облачной трехмерной модели объекта на упрощенную трехмерную модель из кубиков-вокселей, а для формирования «воксельной

решетки», для которой прореживание производится внутри каждого вокселя с сохранением точки, которая может быть выражена и как центр тяжести вокселя, и как его геометрический центр. При этом будет производиться исключение из облака избыточных точек.

Так, формула размерности воксельной решетки может быть выражена для трехмерного облака точек в следующем виде [9]:

$$\left[\frac{\max X - \min X}{V_s}\right] \times \left[\frac{\max Y - \min Y}{V_s}\right] \times \left[\frac{\max Z - \min Z}{V_s}\right], \quad (1)$$

где V_s – размер вокселя в воксельной решетке; $\max X$ – максимальное значение координаты X облака точек; $\min X$ – минимальное значение координаты X облака точек; $\max Y$ максимальное значение координаты Y облака точек; $\min Y$ – минимальное значение координаты Y облака точек; $\max Z$ – максимальное значение координаты Z облака точек; $\min Z$ – минимальное значение координаты Z облака точек.

Для удобства можно переопределить координаты каждой точки в новой системе координат воксельной решетки по следующим формулам [9]:

$$V_{ix} = \left[\frac{X_i - \min X}{V_s}\right]$$
$$V_{iy} = \left[\frac{Y_i - \min Y}{V_s}\right], \quad (2)$$
$$V_{iy} = \left[\frac{Z_i - \min Z}{V_s}\right]$$

где V_s – размер вокселя в воксельной решетке; V_{ix} – координата X точки в системе координат воксельной решетки; V_{iy} – координата Y точки в системе координат воксельной решетки; V_{iz} – координата Z точки в системе координат воксельной решетки.

Ключевым параметром при построении воксельной решетки в данном случае выступает размер V_s вокселя воксельной решетки.

Однако при таком прореживании для соблюдения принципа минимальной потери информативности модели важно также учесть необходимость сохранения характерных линий и точек местности и различных объектов. Это позволяет сделать вывод, что некое облако точек, представляющее собой модель местности или объекта, не может быть прорежено через общую воксельную решетку определенной размерности. Вместо этого предлагается выделить из общего облака точек участки (сегменты), содержащие важные характерные линии и точки модели местности и объектов, а также «плоские» участки, и для каждого такого сегмента построить отдельные воксельные решетки с меньшей размерностью (для более детализированных участков модели местности и объектов) или большей размерностью (для «плоских» участков) для исключения потери информативности после прореживания.

Таким образом, метод вокселизации предлагается дополнить методом сегментации. Комбинация этих методов позволит за счет сегментации выделять в конечном облаке модели местности и объектов области, обладающие примерно однородной плотностью в своих пределах и содержащие как важные характерные линии и точки модели местности и объектов, так и малоинформативные «плоские» участки, а за счет метода вокселизации – строить отдельные воксельные решетки и прореживать через них каждую выделенную в процессе сегментации область единого облака точек модели.

Таким образом, предлагаемая методика прореживания облаков точек будет состоять из следующих этапов:

– выделение сегментов в исходном облаке точек, обладающих примерно однородной плотностью и содержащих в себе важные характерные линии и точки местности и объектов (рис. 3);

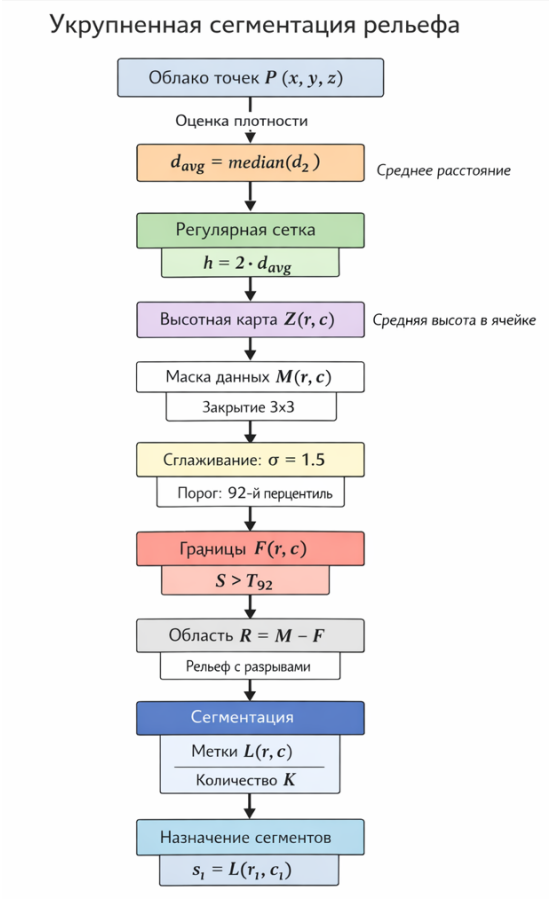


Рис. 3. Алгоритм укрупненной сегментации облака точек

– автоматизированный подбор размера V_s воксельной решетки для каждого выделенного сегмента по формуле адаптивного подбора размера вокселя через функцию ограничения значения (clip) [7]:

$$V_s = clip\left(d_{avg} \cdot \frac{15}{1+2\cdot\frac{\sigma_z}{d_{avg}}}, 2d_{avg}, 20d_{avg}\right), \quad (3)$$

где d_{avg} – среднее расстояние между точками в сегменте (показатель плотности), м; σ_z – среднеквадратическое отклонение по распределению высот точек в сегменте;

– построение отдельных воксельных решеток для выделенных сегментов в облаке точек и осуществление их прореживания.

На взгляд авторов, эффективность предложенной методики будет зависеть от ряда факторов:

– от учета однородности областей облака по показателю плотности и их выделения в сегменты за счет применения известных алгоритмов пространственного анализа облака точек;

– оптимального для сегмента облака точек с некоторой однородной плотностью размера вокселя воксельной решетки;

– способа расчета положения результирующей точки, остающейся после прореживания облака внутри каждого вокселя;

– итогового количества результирующих точек, остающихся после прореживания сегментов облака точек.

Требования к минимальному количеству результирующих точек связаны с требованиями к минимальной плотности облака точек лазерного отражения.

Так, для расчета минимального количества результирующих точек предлагается применять формулу, приведенную в ГОСТ Р 70690–2023 (ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги». – URL: https://docs.cntd.ru. – Текст: электронный):

$$P_{\min} = \left(\frac{1}{k}+1\right)^2, \quad (4)$$

где $P_{\min}$ – минимальное количество точек лазерного отражения на 1 м^2; k – допуск погрешности измерений в соответствии с видом проводимых работ, м. В тех случаях, когда $k \geq 1$, минимальное количество точек должно составлять не менее 10 на 1 м^2.

По мнения авторов, под видом проводимых работ при этом подразумевается вид съемки (с учетом ее масштаба, типа местности и т. п.), а под допуском погрешности понимается средняя квадратическая погрешность съемки.

Согласно СП 317.1325800.2017 (СП 317.1325800.2017 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». – URL: https://docs.cntd.ru. – Текст: электронный) среднюю квадратическую погрешность съемки следует рассчитывать по формуле

$$m = 1,25\zeta_{ср}, \quad (5)$$

где m – среднеквадратическая погрешность съемки; $\zeta_{ср}$ – средняя погрешность съемки.

При этом средняя погрешность съемки рельефа относительно ближайших точек геодезического обоснования не должна превышать по высоте согласно СП 47.13330.2016 (СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96». – URL: https://docs.cntd.ru. – Текст: электронный):

– 1/4 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона до 2°;

– 1/3 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона от 2 до 6° для планов масштабов 1 : 5 000, 1 : 2 000 и до 10° для планов масштабов 1 : 1 000 и 1 : 500;

– 1/3 при сечении рельефа через 0,5 м на планах масштабов 1 : 5 000 и 1 : 2 000.

На основе проведенного анализа была составлена таблица минимального количества точек лазерного отражения в зависимости от масштаба съемки, типа местности и высоты сечения рельефа (табл. 1).

Таблица 1. Минимальное количество точек лазерного отражения в зависимости от типа местности, масштаба съемки и высоты сечения рельефа

Масштаб / Высота сечения рельефа	1 : 5 000	1 : 2 000	1 : 1 000 1 : 500
Рельеф равнинный с углами наклона до 2°			
0,5 м	$\zeta_{ср}$ = 0,17 м m = 0,21 м P_{min} = 34	$\zeta_{ср}$ = 0,17 см m = 0,21 см P_{min} = 34	$\zeta_{ср}$ = 0,13 см m = 0,16 см P_{min} = 53
1,0 м	$\zeta_{ср}$ = 0,25 м m = 0,31 м P_{min} = 18	$\zeta_{ср}$ = 0,25 м m = 0,31 м P_{min} = 18	-
Всхолмленный с углами наклона до 4°			
0,5	-	$\zeta_{ср}$ = 0,17 см m = 0,21 см P_{min} = 34	$\zeta_{ср}$ = 0,17 см m = 0,21 см P_{min} = 34
1,0	$\zeta_{ср}$ = 0,33 м m = 0,42 м P_{min} = 11	$\zeta_{ср}$ = 0,33 м m = 0,42 м P_{min} = 11	-
2,0	$\zeta_{ср}$ = 0,67 м m = 0,83 м P_{min} = 5 (10)	$\zeta_{ср}$ = 0,67 м m = 0,83 м P_{min} = 5 (10)	-
Пересеченный с углами наклона до 6°			
0,5	-	-	$\zeta_{ср}$ = 0,17 см m = 0,21 см P_{min} = 34
1,0	-	$\zeta_{ср}$ = 0,33 м m = 0,42 м P_{min} = 11	$\zeta_{ср}$ = 0,33 м m = 0,42 м P_{min} = 11
2,0	$\zeta_{ср}$ = 0,67 м m = 0,83 м P_{min} = 5 (10)	$\zeta_{ср}$ = 0,67 м m = 0,83 м P_{min} = 5 (10)	-
5,0	$\zeta_{ср}$ = 1,67 м m = 2,08 м P_{min} = 3 (10)	-	-

Результаты и обсуждение

Для апробации предложенной методики была осуществлена съемка участка производственной территории нефтеперерабатывающего завода на территории Краснодарского края с применением воздушного лазерного сканирования. В соответствии с техническим заданием масштаб съемки составлял 1 : 500, высота полета составляла 500 м. Для получения исходного облака точек при производстве воздушного лазерного сканирования применялся сканер Leica ALS80-HP, основные метрологические характеристики которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Метрологические характеристики сканеров Leica ALS80-CM, Leica ALS80-HP, Leica ALS80-UP

Наименование характеристики	Значение		
Диапазон рабочих высот, м	Leica ALS80-CM	Leica ALS80-HP	Leica ALS80-UP
	От 100 до 1600	От 100 до 3500	От 100 до 5000
Предел допускаемого СКО измерений координат точек земной поверхности в заданной системе координат, м:	Диапазон рабочих высот, м		
	100–800 / 800–1 600	100–1 600 / 1 600–3 500	100–2 500 / 2 500–5 000
– в плане; – по высоте	0,10 / 0,23 0,08 / 0,12	0,23 / 0,41 0,12 / 0,20	0,29 / 0,58 0,18 / 0,26
Пределы допускаемой абсолютной погрешности определения координат точек земной поверхности в заданной системе координат, м:	Диапазон рабочих высот, м		
	100–800 / 800–1 600	100–1600 / 1 600–3 500	100–2 500 / 2 500–5 000
– в плане; – по высоте	0,18 / 0,41 0,14 / 0,21	0,41 / 0,74 0,21 / 0,36	0,52 / 1,04 0,32 / 0,47
Угловое поле сканирования (от вертикали), градус, не менее	±36,0		
Максимальная частота сканирования, Гц	200		
Максимальная частота импульсов, кГц	1 000		

Так как участок местности по типу рельефа относился к равнинному с углами наклона до 2°, а требуемый масштаб съемки в соответствии с техническим заданием был принят равным 1 : 500, то высота сечения рельефа в соответствии с таблицей В.1 СП 47.13330.2016 была принята 0,5 м. Следовательно, для съемки масштаба 1 : 500 с принятой высотой сечения рельефа 0,5 м допустимая средняя погрешность съемки рельефа по высоте составляет около 13 см, средняя квадратическая погрешность – 16 см, а минимальное количество точек лазерного отражения должно составлять 53.

Для реализации предложенной методики прореживания облаков точек на основе усовершенствованного метода вокселизации и сегментации была написана специализированная программа на языке программирования Python.

Исходное облако точек, полученное по результатам воздушного лазерного сканирования, состоящее из 150 885 точек, представлено на рис. 4.

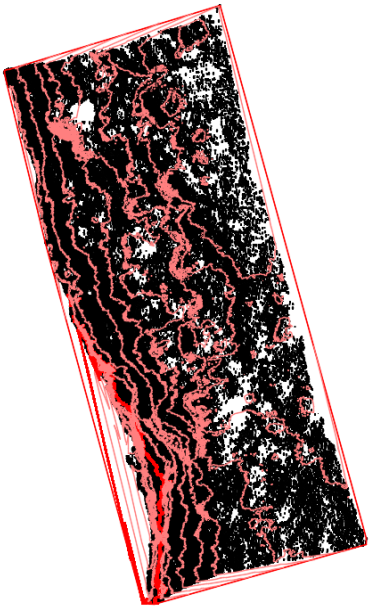


Рис. 4. Исходное облако точек, полученное по результатам воздушного лазерного сканирования с построенной поверхностью с горизонталями через 0,1 м (вид сверху), масштаб 1 : 2 000

С помощью написанной специализированной программы было выделено в исходном облаке точек 344 сегмента по показателю плотности (рис. 5).

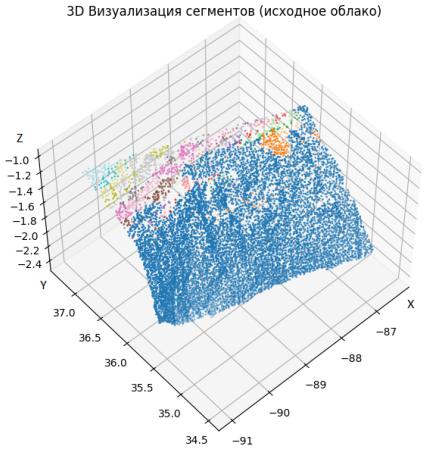


Рис. 5. Визуализация сегментов в исходном облаке точек, изометрический вид в осях *XYZ*

Для каждого сегмента с применением формулы адаптивного подбора размера вокселя с помощью специализированной программы на языке программирования Python был рассчитан размер воксельной решетки, визуализация которой для одного из сегментов была осуществлена для наглядности в программном комплексе Civil 3D с встроенным модулем Dynamo (рис. 6).

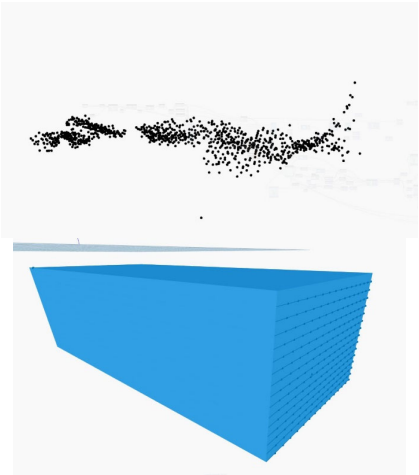


Рис. 6. Визуализация воксельной решетки для выделенного сегмента из исходного облака точек, состоящего из 1 500 точек

Civil 3D – это программный продукт, используемый для инженерного проектирования и создания трехмерных моделей объектов промышленной и гражданской инфраструктуры, а модуль Dynamo – это надстройка для визуального объектно-ориентированного программирования, позволяющая автоматизировать проектирование в Civil 3D за счет создания алгоритмов выполнения дополнительных команд.

Внутри каждого вокселя было произведено прореживание, по итогам которого на основе оставшихся результирующих точек во всех выделенных 344 сегментах была еще раз построена TIN-поверхность с выделением горизонталей с высотой сечения рельефа 0,1 м, представленная на рис. 7.

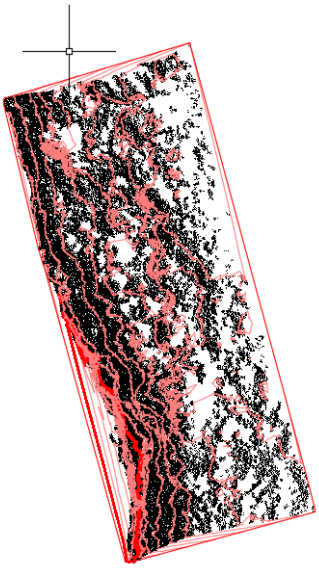


Рис. 7. Облако точек после прореживания с построенной поверхностью с горизонталями через 0,1 м (вид сверху), масштаб 1 : 2 000

Итоговое количество результирующих точек составило 96 421 на 8 м^2 (12 051 точек на 1 м^2), что удовлетворяет требованиям к минимально допустимому количеству точек лазерного отражения для данного вида работ (53 точки на 1 м^2).

При этом процент прореживания (p) составил

$$p = \frac{150\,885 - 96\,421}{150\,885} \times 100 = 36\,\%. \qquad (6)$$

Заключение

Предложена методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации. Показана эффективность использования метода сегментации в прореживании единого облака точек модели местности для выделения из общего облака точек участков (сегментов), содержащих важные характерные линии и точки модели местности, а также «плоских» участков, с целью дальнейшего построения отдельных воксельных решеток для каждого из выделенных сегментов, чтобы исключить потери информативности после прореживания.

Предложено использовать формулу из ГОСТ Р 70690–2023 (ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги». – URL: https://docs.cntd.ru. – Текст: электронный) для расчета минимального допустимого количества точек лазерного отражения на 1 м^2 в зависимости как от вида сканирования (с учетом технических характеристик сканера), так и от типа местности и масштаба съемки.

Для реализации предложенной методики прореживания облаков точек на основе комбинации методов вокселизации и сегментации произведено выделение сегментов в облаке точек тестового участка местности и построение воксельной решетки, а также дальнейшее прореживание каждого из выделенных сегментов с помощью специализированной программы, написанной на языке Python. Произведено сравнение результирующего количества точек облака точек после прореживания с минимальным допустимым количеством точек лазерного отражения на 1 м^2 для съемки масштаба 1 : 500 равнинного участка местности с высотой сечения рельефа 0,5 м, а также рассчитан процент прореживания, который составил 36 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Axelsson P. E. Processing of laser scanner data – Algorithms and applications // ISPRS Journal of Photogrammetry and RemoteSensing. 1999. № 54. P. 138–147.
2. Axelsson, P. E. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. № 33. P. 110–117.
3. Stelling N., Richter K. Voxel based representation of full-waveform airborne laser scanner data for forestry applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial In-formation Sciences. Prague: XXIII ISPRS Congress, 2016. P. 41–50.
4. Blender Foundation. Blender Foundation URL: https://www.blender.org/about/foundation/ (дата обращения: 18.09.2025).
5. Chen Z., Gao B., Devereux B. State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. Sensors. 2017. №17. P. 150–159.
6. Haugerud R. A., Harding D. J. Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2001. № 34. P. 211–218.
7. Sithole G., Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. № 59. P. 85–101.
8. Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. № 33. P. 935–942.
9. Xiong B., Jiang W., Li, D., Qi, M. Voxel Grid-Based Fast Registration of Terrestrial Point Cloud. Remote Sens. 2021. № 13. P. 190–203.
10. Bienert, A., Hess C., Maas H.-G., von Oheimb G. A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. XL-5. P. 101–106.

11. Buddenbaum, H., Seeling S., Hill J. Fusion of full-waveform LiDAR and imaging spectroscopy remote sensing data for the characterization of forest stands. International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34, no. 13. P. 4511–4524.

12. Gupta, S., Weinacker H., Koch B. Single tree detection using full waveform laser scanner data. Proceedings of Silvilaser 2010. P. 368–376.

13. Heinzel, J., Koch B. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. Vol. 13, no. 1. P. 152–160.

14. Richter, K., Blaskow B., Stelling N., Maas H.-G. Reference value provision schemes for attenuation correction of full-waveform airborne laser scanner data. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. II-3/W5. P. 65–72. DOI 10.5194/isprsannals-II-3-W5-65-201.

15. Schilling, A., Schmidt A., Maas H.-G. Tree Topology Representation from TLS Point Clouds Using Depth-First Search in Voxel Space. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2012. Vol. 78, no. 4. P. 383–392.

16. Wu, J., van Aardt J. A. N., McGlinchy J., Asner G. P. A Robust Signal Preprocessing Chain for Small-Footprint Waveform LiDAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50, no. 8. P. 3242–3255.

REFERENCES

1. Axelsson, P. (1999). Processing of laser scanner data—algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* Pp. 138–147. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00008-8.

2. Axelsson, P. (2000). DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 33(4). Pp. 110–117. https://ci.nii.ac.jp/naid/10019600405.

3. Stelling, N. & Richter, Katja. (2016). Voxel based representation of full-waveform airborne laser scanner data for forestry applications. *ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLI-B8. Pp. 755–762. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-755-2016.

4. Blender Foundation. (2018). Official website.

5. Chen, Ziyue & Gao, Bingbo & Devereux, Bernard. (2017). State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. *Sensors.* 17. 150. https://doi.org/10.3390/s17010150.

6. Haugerud, R. & Harding, David. (2001). Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LiDAR topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Pp. 211–218.

7. Sithole, George & Vosselman, George. (2004). Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 59. Pp. 85–101. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004.

8. Vosselman, George. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *IAPRS*. XXXIII. Pp. 935–942.

9. Xiong, Biao & Jiang, Weize & Li, Dengke & Qi, Man. (2021). Voxel Grid-Based Fast Registration of Terrestrial Point Cloud. *Remote Sensing*. 13. 1905. Pp. 190–203. https://doi.org/10.3390/rs13101905.

10. Bienert, A., Hess, C., Maas, H.-G., von Oheimb, G. (2014). A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. Int. Arch. Photogramm. *Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, pp. 101–106.

11. Buddenbaum H., Seeling S., Hill J. (2013). Fusion of full-waveform lidar and imaging spectroscopy remote sensing data for the characterization of forest stands. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), pp. 4511–4524.

12. Gupta, S., Weinacker, H., Koch, B. (2010). Single tree detection using full waveform laser scanner data. *Proceedings of Silvilaser* 2010, pp. 368–376.

13. Heinzel, J., Koch, B. (2011). Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), pp. 152–160.

14. Richter, K., Blaskow, B., Stelling, N., Maas, H.-G. (2015). Reference value provision schemes for attenuation correction of full-waveform airborne laser scanner data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (*2015), II- 3/W5, pp. 65–72. DOI 10.5194/isprsannals-II-3-W5-65-201.

15. Schilling, A., Schmidt, A., Maas, H.-G. (2012). Tree Topology Representation from TLS Point Clouds Using Depth-First Search in Voxel Space. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78 (4), pp. 383–392.

16. Wu, J., van Aardt, J. A. N., McGlinchy, J., Asner, G. P. (2012). A Robust Signal Preprocessing Chain for Small-Footprint Waveform LiDAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 50 (8), pp. 3242–3255.

Об авторах

Нафсет Инвербиевна Хушт – старший инженер отдела генеральных планов и транспорта Дирекции по проектированию.

Михаил Ярославович Брынь – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геодезии.

Author details

Nafset I. Khusht – Senior Engineer, General Plans and Transport Department of the Design Directorate.

Mikhail Ya. Bryn – DSc, Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy.

Получено / Received 29.01.2026
Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2026
Принята к публикации / Accepted 24.08.2026

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 528.71:551.556
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-64-73

Статистический анализ влияния скорости ветра на возникновение прибрежного апвеллинга в море Лаптевых по материалам космических съемок

К. К. Лоссов[1]✉, *В. А. Малинников*[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), г. Москва, Российская Федерация

e-mail: lssksn@gmail.com

Аннотация. Целью представленного исследования является статистическая оценка связи между скоростью ветра и температурой поверхности моря (ТПМ) в зоне прибрежного апвеллинга вблизи дельты р. Лены в море Лаптевых, а также анализ прогностического потенциала приземных полей ветра для выявления условий, благоприятных для его возникновения. В качестве исходных данных использованы спутниковые измерения ТПМ прибором SLSTR спутника Sentinel-3, а также данные реанализа ERA5 (ECMWF), характеризующие приземную скорость ветра. Для описания зависимости ТПМ от скорости ветра применена полиномиальная регрессия, степень полинома выбиралась по значению скорректированного коэффициента детерминации (Adjusted R^2). Установлено, что кубическая модель наилучшим образом описывает нелинейную связь между ТПМ и скоростью ветра (Adj.R^2 = 0,3876, *SE* = 1,34 °C). Показано, что ветер в секторах В/ЮВ и ЗСЗ со скоростью более 7 м/с за двое суток до события является статистически значимым предиктором апвеллинга в исследуемом районе.

Ключевые слова: апвеллинг, море Лаптевых, скорость ветра, температура поверхности моря, полиномиальная регрессия, ERA5, Sentinel-3

Для цитирования:
Лоссов К. К., Малинников В. А. Статистический анализ влияния скорости ветра на возникновение прибрежного апвеллинга в море Лаптевых по материалам космических съемок. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 64–73. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-64-73

Wind velocity as a primary predictor of Laptev Sea upwelling: a remote sensing assessment

K. K. Lossov[1]✉, *V. A. Malinnikov*[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: lssksn@gmail.com

Abstract. The study presents a statistical assessment of the relationship between wind speed and sea surface temperature (SST) within the coastal upwelling zone adjacent to the Lena River delta in the

© К. К. Лоссов, В. А. Малинников, 2026

Laptev Sea. Furthermore, it evaluates the prognostic utility of surface wind fields for the early identification of upwelling-favorable conditions. The analysis leverages satellite-derived SST observations from the sea and land surface temperature radiometer (SLSTR) aboard Sentinel-3, complemented by surface wind velocity fields from the ERA5 reanalysis product (ECMWF). The functional dependence of SST on wind speed was modeled using polynomial regression, where the optimal polynomial degree was determined by maximizing the adjusted coefficient of determination (Adj. R^2). The obtained results indicate that a cubic model provides the best fit for the non-linear relationship between the variables (Adj.R^2 = 0.3876, SE = 1.34 °C). Crucially, the analysis identifies wind in the easterly/southeasterly (E/SE) and west-northwesterly (WNW) sectors with speeds exceeding 7 m/s, observed 48 hours prior to the event, as a statistically significant predictor of upwelling onset in the study region.

Keywords: upwelling, Laptev Sea, wind speed, sea surface temperature, polynomial regression, ERA5, Sentinel-3

For citation:
Lossov K. K., Malinnikov V. A. (2026). Wind velocity as a primary predictor of Laptev Sea upwelling: a remote sensing assessment. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 64–73. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-64-73

Введение

Прибрежный апвеллинг представляет собой океанографическое явление, при котором глубинные воды поднимаются к поверхности в результате экмановского переноса [1], вызванного действием ветра. В морях северных широт апвеллинг играет исключительно важную роль: он обеспечивает вертикальный перенос питательных веществ из глубинных слоев в фотическую зону, стимулируя первичную продукцию фитопланктона и поддерживая функционирование всей пищевой цепи арктических экосистем[2–4]. В отличие от хорошо изученных апвеллинговых систем умеренных и тропических широт (побережья Калифорнии, Перу, Западной Африки) [5], прибрежный апвеллинг в арктических шельфовых морях до сих пор остается недостаточно исследованным.

Море Лаптевых, являющееся одним из окраинных морей Северного Ледовитого океана, характеризуется рядом уникальных физико-географических особенностей. Более 53 % его акватории приходится на мелководный шельф с глубинами менее 50 м. Основным источником пресноводного стока является река Лена, среднемноголетний расход которой варьируется от 463 до 663 км³/год, формируя обширный распресненный плюм в южной части моря. Безледный период в данном регионе приходится на июль – сентябрь, в это время создаются условия, благоприятные для развития ветрового апвеллинга.

Механизм прибрежного апвеллинга в море Лаптевых основан на экмановском переносе, индуцируемом ветрами, направленными от берега. При ветрах восточного и юго-восточного направлений относительно берегов дельты Лены происходит сгон поверхностных распресненных вод в открытое море. В результате в прибрежной зоне возникает дефицит воды, компенсируемый подъемом более холодных и соленых глубинных вод. Этот процесс приводит к характерному понижению ТПМ и повышению солености в прибрежной полосе, что фиксируется методами спутникового дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне. Помимо классического экмановского механизма, описан апвеллинг, возникающий в зоне между плюмами рек Лены и Оленёк при северо-западных ветрах [6].

В работе [7] на основе спутниковых данных Sentinel-3 SLSTR проводилась идентификация серии апвеллинговых событий вблизи дельт крупных рек в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, продемонстрировав, что направленные от берега ветры скоростью более 6–8 м/с, действующие в течение 1–3 суток, способны вызвать значительное понижение ТПМ. В работе [6] детально исследовали структуру и изменчивость плюмов Лены и Оленёк. Несмотря

на достигнутый прогресс, количественная связь между характеристиками ветра и интенсивностью апвеллинга в море Лаптевых остается недостаточно изученной.

Целью настоящей статьи является количественная оценка связи между скоростью ветра и температурой поверхности моря в зоне прибрежного апвеллинга вблизи дельты р. Лены. Для достижения цели использованы спутниковые данные ТПМ (Sentinel-3 SLSTR, GHRSST MUR L4 SST) и данные реанализа ветра ERA5. Основной методический инструмент, использованный в рамках данного исследования, – полиномиальная регрессия с оптимизацией степени полинома по критерию Adjusted R^2.

Район исследования и данные

Район исследования расположен в южной части моря Лаптевых, в зоне непосредственного влияния пресноводного плюма р. Лены. Данный район характеризуется мелководным шельфом с глубинами преимущественно 10–30 м, значительной пространственной изменчивостью гидрологических параметров в безледный период и высокой чувствительностью к ветровому воздействию (табл. 1). Для анализа апвеллинговых событий была определена траектория из 12 контрольных точек (рис. 1) от координат 74,53° с. ш., 123,08° в. д. до 74,07° с. ш., 127,91° в. д. (табл. 2).

Таблица 1. Данные по скорости ветра и значениям ТПМ вдоль траектории

Точка	Скорость ветра м/с (лаг 2 дня)	Значение ТПМ
Дата: 15.07.2022 – апвеллинг отсутствует		
1	2,9	5,4
2	2,9	6,3
3	2,9	5,7
4	3,5	5,4
5	2,9	5,5
6	2,3	5,1
7	2,9	6
8	3,5	7,5
9	3,5	7,05
10	3,8	7,05
11	2,9	7,5
12	2,9	6,45
Дата: 25.07.2023 – апвеллинг присутствует		
1	7,54	4,5
2	7,5	4,65
3	7,49	4,8
4	7,66	4,95
5	7,61	5,1
6	7,57	5,25
7	8,19	5,4
8	8,11	5,7
9	8,48	6,0
10	8,26	6,3
11	8,96	6,45
12	9,11	6,6

Окончание табл. 1

Точка	Скорость ветра м/с (лаг 2 дня)	Значение ТПМ
Дата: 31.08.2019 – апвеллинг присутствует		
1	8,3	2,25
2	7,7	2,55
3	7,7	2,85
4	7,7	2,85
5	8,3	2,85
6	8,3	1,2
7	7,7	3,3
8	7,7	3,15
9	6,8	2,85
Дата: 22.08.2019 – апвеллинг присутствует		
1	5,9	7,65
2	5,9	7,95
3	5,9	7,95
4	5,9	7,5
8	5,9	7,65
9	5,3	7,65
10	5,3	6,3
11	5,3	7,35
12	5,9	7,5
Дата: 31.07.2018 – апвеллинг отсутствует		
1	5,2	6,3
2	5,2	7,35
3	5,2	5,55
4	5,2	5,25
5	5,2	6,75
6	5,2	6,9
7	5,2	5,25
8	5,2	5,55
9	5,2	6,15
10	5,2	3,9
11	5,2	5,85
12	5,2	6,75
Дата: 06.08.2018 – апвеллинг присутствует		
1	10,7	4,95
2	9,8	3,75
3	10,1	4,8
4	10,1	3,75
5	10,1	2,85
6	10,1	2,85
7	10,1	3,6
8	10,1	3,0
9	10,7	4,5

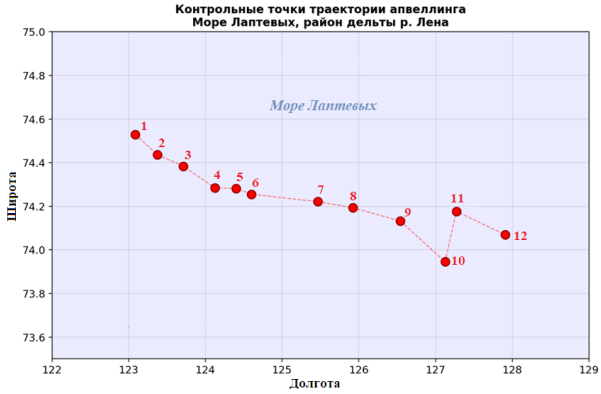


Рис. 1. Расположение контрольных точек траектории апвеллинга в море Лаптевых (район дельты р. Лены)

Таблица 2. Координаты контрольных точек траектории апвеллинга

Точка	Широта, °N	Долгота, °E
1	74,5294	123,0837
2	74,4364	123,3758
3	74,3833	123,7121
4	74,2848	124,1237
5	74,2815	124,3980
6	74,2550	124,6016
7	74,2208	125,4661
8	74,1930	125,9248
9	74,1322	126,5399
10	73,9452	127,1241
11	74,1765	127,2706
12	74,0691	127,9074

В качестве основного источника данных о ТПМ использованы спутниковые снимки прибора SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) спутников серии Sentinel-3 [8] с пространственным разрешением около 1 км и точностью 0,3 °C. Дополнительно для валидации привлекался продукт GHRSST MUR L4 SST [9] с разрешением 0,01° (~1 км).

Данные о приземном ветре получены из реанализа ERA5 [10, 11] (ECMWF). Использованы компоненты зонального (u10) и меридионального (v10) ветра на высоте 10 м, осредненные за сутки. Доступ к данным осуществлялся через Open-Meteo Historical API [12]. При формировании выборки учитывался временной лаг 2 суток.

Анализ охватывал четыре подтвержденных события апвеллинга, а также контрольные даты без его признаков. Визуальная верификация событий проводилась с использованием сервиса NASA Worldview [13] (рис. 2).

Рис. 2. Спутниковый снимок ТПМ (*GHRSST MUR L4 SST, NASA WorldView*) за 09.08.2018

Методика

Формирование выборки осуществлялось следующим образом: для каждого спутникового снимка в каждой из 12 контрольных точек траектории измерялись значения ТПМ и скорости ветра (с лагом 2 суток). Скорость ветра вычислялась по формуле

$$V = \sqrt{(u^2 + v^2)}, \qquad (1)$$

направление определялось по стандартной метеорологической конвенции. Итоговая выборка составила $n = 63$ наблюдения.

Для описания зависимости ТПМ от скорости ветра использована полиномиальная регрессия вида

$$T = b_0 + b_1 \cdot v + b_2 \cdot v^2 + \ldots + b_k \cdot v^k, \qquad (2)$$

где T – ТПМ (°C); v – скорость ветра (м/с); k – степень полинома.

Для выбора оптимальной степени полинома использовались коэффициент детер-

минации R^2, скорректированный коэффициент детерминации $\text{Adjusted } R^2 = \dfrac{1-\left(1-R^2\right)\cdot(n-1)}{(n-k-1)}$ и стандартная ошибка регрессии $S_E = \sqrt{\dfrac{SS_{res}}{n-k-1}}$.

Дополнительно проводился анализ остатков регрессии: нормальность распределения оценивалась по Q–Q-графику (Normal Probability Plot), однородность дисперсии проверялась по графику «остатки от предсказанных значений» (Predicted vs. Residuals).

Тестировались полиномиальные модели степеней от 1 до 5. Оптимальной признавалась модель с максимальным Adj.R^2 при условии случайности остатков и отсутствия признаков переобучения. Вычисления выполнены в MATLAB R2024a.

Результаты

Результаты полиномиальной регрессии для степеней от 1 до 5 сведены в табл. 3 и рис. 3. Данные демонстрируют немонотонную зависимость скорректированного коэффициента детерминации от степени полинома, что указывает на существование оптимальной степени сложности модели.

Таблица 3. Метрики полиномиальной регрессии для различных степеней полинома

Степень полинома	R^2	Adj. R^2	Std. Error, °C
1	0,3006	0,2891	1,4425
2	0,3192	0,2965	1,4350
3	0,4172	0,3876	1,3388
4	0,4173	0,3772	1,3502
5	0,4231	0,3725	1,3553

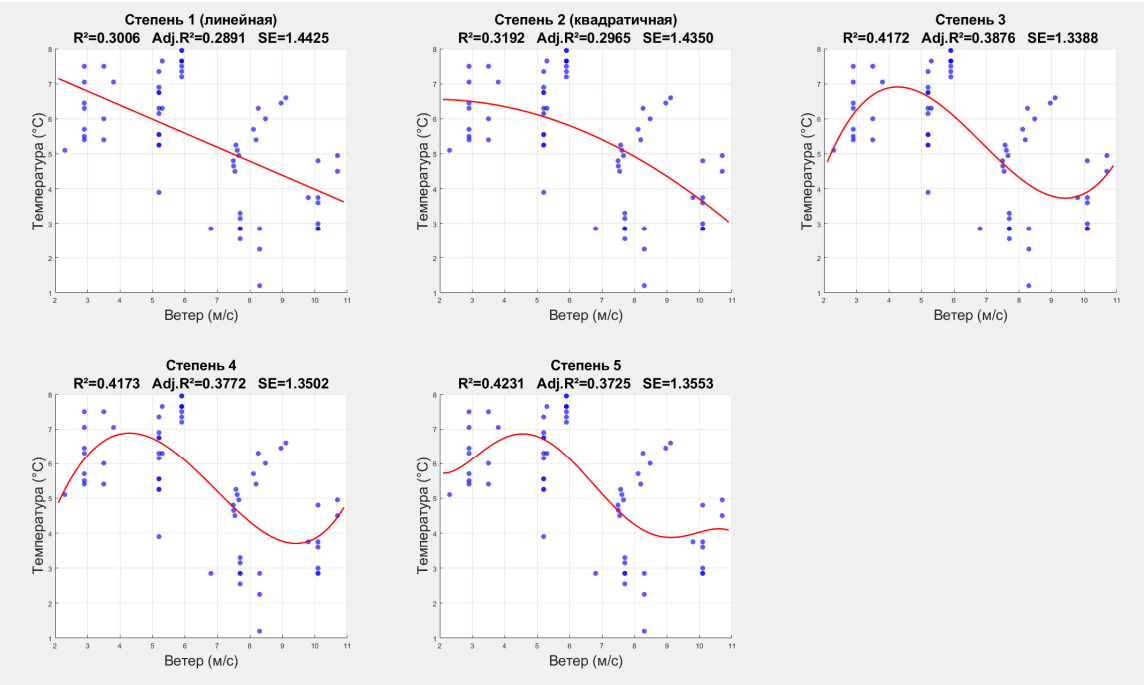


Рис. 3. Сравнение полиномиальной регрессии степеней 1–5: scatterplot Температура ~ Ветер с аппроксимирующими кривыми $n = 63$

Линейная модель (степень 1) показывает $R^2 = 0{,}30$ и Adj.$R^2 = 0{,}29$. Квадратичная модель (степень 2) обеспечивает лишь минимальный прирост качества: Adj.R^2 увеличивается на 0,007. Кубическая модель (степень 3) демонстрирует качественный скачок: Adj.R^2 достигает 0,3876, стандартная ошибка снижается до 1,34 °C. Кубическая кривая отражает характерную трехфазную нелинейную зависимость ТПМ от скорости ветра (рис. 4).

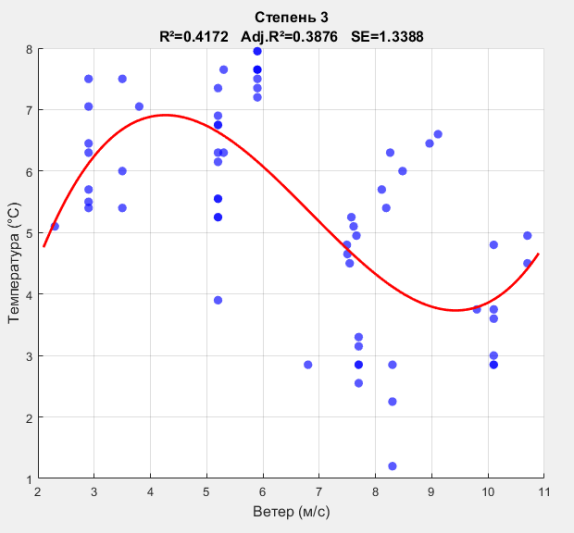


Рис. 4. Оптимальная кубическая модель (степень 3): зависимость ТПМ от скорости ветра (лаг 2 суток)

Модели степеней 4 и 5 не приводят к улучшению: Adj.R^2 составляет 0,3772 и 0,3725 соответственно – оба значения ниже, чем у кубической модели. На диагностических графиках появляются крупные выбросы, аппроксимирующие кривые начинают осциллировать, что является характерным признаком переобучения.

Таким образом, кубическая полиномиальная модель (степень 3) признана оптимальной по совокупности критериев: максимальное Adj.R^2, минимальная стандартная ошибка, нормальность и случайность остатков (рис. 5).

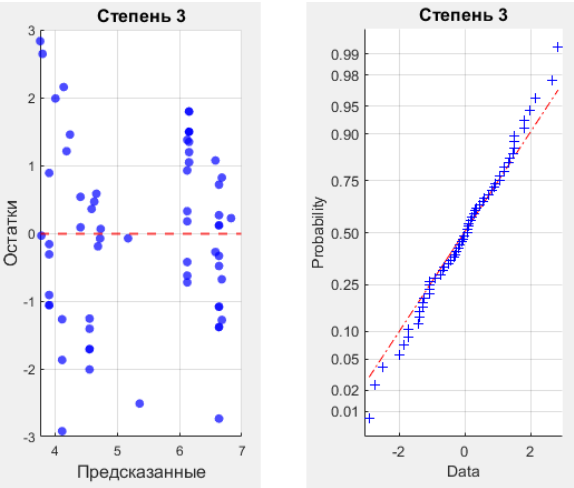


Рис. 5. График остатков (Predicted vs Residuals) и Normal Probability Plot кубической модели (степень 3)

Данные табл. 4 показывают, что три из четырех подтвержденных событий апвеллинга сопровождались ветром скоростью более 7 м/с в секторах В/ЮВ или ЗСЗ/З за двое суток до регистрации понижения ТПМ. Событие 20.07.2023 представляет исключение: ветер имел скорость 3,6–4,7 м/с и юго-юго-западное направление. Данное наблюдение может объясняться иным механизмом, а именно апвеллингом между плюмами рек Лены и Оленёк при северо-западных ветрах, описанным в [6].

Таблица 4. Характеристики ветра для подтвержденных событий апвеллинга

Дата события	Дата ветра (лаг −2 дня)	Средняя скорость, м/с	Направление	Апвеллинг
09.08.2018	07.08.2018	~9,2	В/ЮВ	ДА
03.08.2019	01.08.2019	~7,7	В/ЮВ	ДА
20.07.2023	18.07.2023	3,6–4,7	ЮЮЗ	ДА
25.07.2023	23.07.2023	7,5–9,1	ЗСЗ/З	ДА

Дополнительно была выполнена оценка связи между средней скоростью ветра за 48 ч до события и текстурными признаками Харалика [14]. Коэффициенты корреляции Пирсона между скоростью ветра и четырьмя признаками Харалика (контраст, корреляция, максимальный коэффициент корреляции, энтропия) по модулю не превысили 0,11, что указывает на отсутствие выраженной линейной связи между скоростью ветра и текстурными дескрипторами ТПМ в пределах анализируемой выборки.

Обсуждение

Полученная кубическая модель объясняет приблизительно 39 % дисперсии ТПМ в зоне апвеллинга. Оставшийся 61 % дисперсии определяется объемом и температурой речного стока Лены, степенью стратификации водной толщи, ледовой обстановкой, интенсивностью солнечного облучения поверхности моря, а также пространственной неоднородностью батиметрии. Тем не менее выявленная статистически значимая связь подтверждает ключевую роль ветрового воздействия.

Физическая интерпретация кубической зависимости может быть описана следующим образом: в диапазоне слабых ветров (менее 5 м/с) ТПМ определяется инсоля-

цией и теплым речным стоком Лены, что препятствует развитию апвеллинга. При средних скоростях (6–9 м/с) экмановский перенос вызывает интенсивный сгон поверхностных вод и подъем холодных глубинных вод, что дает минимум ТПМ. При дальнейшем усилении ветра (более 9–10 м/с) происходит перемешивание всей водной толщи мелководного шельфа, ТПМ принимает промежуточные значения. Именно эта трехфазная зависимость обусловливает адекватность кубической модели.

Результаты анализа подтверждают, что скорость ветра наряду с его направлением играют критическую роль при формировании апвеллинга. К примеру, В/ЮВ ветры создают классический экмановский апвеллинг, а ветры ЗСЗ/З способствуют апвеллингу между плюмами рек Лены и Оленёк, как показано в [6], ветры ЮЮЗ же являются неблагоприятными. Таким образом, скорость ветра является необходимым, но недостаточным условием апвеллинга.

Признаки Харалика в рассматриваемой постановке в большей степени отражают пространственную структуру уже сформировавшейся термической аномалии, чем параметры предшествующего ветрового воздействия. В ранее выполненных исследованиях [15] для изображений, содержащих апвеллинг, была выявлена устойчивая связь признаков Харалика с усредненной ТПМ. Вместе с тем в настоящем исследовании корреляция между скоростью ветра и признаками Харалика оказалась близкой к нулю.

Следует отметить ряд ограничений. Объем выборки (n = 63) относительно невелик. Временной лаг зафиксирован на уровне двух суток, тогда как оптимальный лаг может варьироваться. Направление ветра не включено в регрессионную модель в качестве количественного предиктора. Для повышения надежности необходимо расширение выборки за счет данных CMEMS и ERA5 за период 2003–2025 гг. [9, 10], включение направления ветра и оптимизация временного лага методом кросс-корреляционного анализа.

Заключение

На основании проведенного статистического анализа сформулированы следующие выводы.

1. Кубическая полиномиальная модель (степень 3) наилучшим образом описывает связь между скоростью ветра и ТПМ в зоне апвеллинга: Adj.R^2 = 0,3876, S_E = 1,34 °C. Модели степеней 4 и 5 не обеспечивают прироста качества и демонстрируют признаки переобучения.

2. Скорость ветра более 7 м/с в секторах В/ЮВ и ЗСЗ за двое суток до события статистически связана с понижением ТПМ, характерным для прибрежного апвеллинга; три из четырех подтвержденных событий соответствуют данному критерию. Это указывает на принципиальную возможность использования данных о приземном ветре для краткосрочного прогнозирования условий, благоприятных для возникновения прибрежного апвеллинга в исследуемом районе. Вместе с тем фиксированный лаг двое суток следует рассматривать как первое приближение, требующее дальнейшей оптимизации с учетом межгодовой и синоптической изменчивости.

3. Ветер является необходимым, но недостаточным условием развития апвеллинга. Скорость ветра объясняет около 39 % дисперсии ТПМ; оставшаяся часть определяется речным стоком, стратификацией, ледовой обстановкой и другими факторами. Для повышения прогностической способности моделей апвеллинга требуется расширение набора предикторов и уточнение временных лагов между ветровым воздействием и температурным откликом.

Статья выполнена в рамках государственного задания FSFE-2026-0003 Минобрнауки России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stewart R. H. Introduction to Physical Oceanography. Texas A&M University, 2008. Chapter 9: Ekman Transport and Coastal Upwelling.

2. Randelhoff A., Sundfjord A. Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing. Ocean Science. 2018. Vol. 14. P. 293–300. DOI 10.5194/os-14-293-2018.

3. Tuerena R. E. et al. Nutrient pathways and their susceptibility to past and future change in the Eurasian Arctic Ocean. Ambio. 2021. DOI 10.1007/s13280-021-01673-0.

4. Arrigo K. R., van Dijken G. L. Continued increases in Arctic Ocean primary production. Progress in Oceanography. 2015. Vol. 136. P. 60–70. DOI 10.1016/j.pocean.2015.05.002.

5. Lamont T., Barlow R. G., Brewin R. J. W. Long-term trends in phytoplankton chlorophyll-a and size structure in the Benguela Upwelling System. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. No. 2. P. 1170–1195. DOI 10.1029/2018JC014334.

6. Osadchiev A. A., Savin A. Structure and Variability of the Lena and Olenyok Plumes in the Laptev Sea. Frontiers in Marine Science. 2025. DOI 10.3389/fmars.2025.1681563.

7. Osadchiev A. A., Silvestrova K. P., Korotenko K. A. et al. Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 5. P. 844. DOI 10.3390/rs12050844.

8. Donlon C., Berruti B., Buongiorno Nardelli B. et al. The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 37–57. DOI 10.1016/j.rse.2011.07.024.

9. Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. DOI 10.24381/cds.adbb2d47.

10. GHRSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). NASA JPL PO.DAAC. DOI 10.5067/GHGMR-4FJ04.

11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI 10.1002/qj.3803.

12. Open-Meteo. Historical Weather API (based on ERA5). URL: https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api.

13. NASA Worldview. EOSDIS. URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov/.

14. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1973. Vol. SMC-3. No. 6. P. 610–621. DOI 10.1109/TSMC.1973.4309314.

15. Лоссов К. К., Малинников В. А. Разработка методики использования признаков Харалика для детектирования зон апвеллинга на морской поверхности по материалам космических съемок. Мониторинг. Наука и технологии. 2025. № 4 (66). С. 21–30.

REFERENCES

1. Stewart R. H. Introduction to Physical Oceanography. Texas A&M University, 2008. Chapter 9: Ekman Transport and Coastal Upwelling.

2. Randelhoff A., Sundfjord A. (2018). Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing. *Ocean Science.* Vol. 14. P. 293–300. DOI 10.5194/os-14-293-2018.

3. Tuerena R. E. et al. (2021). Nutrient pathways and their susceptibility to past and future change in the Eurasian Arctic Ocean. *Ambio.* DOI 10.1007/s13280-021-01673-0.

4. Arrigo K. R., van Dijken G. L. (2015). Continued increases in Arctic Ocean primary production. Progress in Oceanography. Vol. 136. P. 60–70. DOI 10.1016/j.pocean.2015.05.002.

5. Lamont T., Barlow R. G., Brewin R. J. W. (2019). Long-term trends in phytoplankton chlorophyll-a and size structure in the Benguela Upwelling System. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* Vol. 124. No. 2. P. 1170–1195. DOI 10.1029/2018JC014334.

6. Osadchiev A. A., Savin A. (2025). Structure and Variability of the Lena and Olenyok Plumes in the Laptev Sea. *Frontiers in Marine Science.* DOI 10.3389/fmars.2025.1681563.

7. Osadchiev A. A., Silvestrova K. P., Korotenko K. A. et al. (2020). Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas. *Remote Sensing.* Vol. 12, No. 5. P. 844. DOI 10.3390/rs12050844.

8. Donlon C., Berruti B., Buongiorno Nardelli B. et al. (2012). The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment.* Vol. 120. P. 37–57. DOI 10.1016/j.rse.2011.07.024.

9. Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. DOI 10.24381/cds.adbb2d47.

10. GHRSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). *NASA JPL PO.DAAC.* DOI 10.5067/GHGMR-4FJ04.

11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. (2020). The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI 10.1002/qj.3803.

12. Open-Meteo. Historical Weather API (based on ERA5). Retrieved from https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api.

13. NASA Worldview. EOSDIS. Retrieved from https://worldview.earthdata.nasa.gov/.

14. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. (1973). Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. SMC-3. No. 6. P. 610–621. DOI 10.1109/TSMC.1973.4309314.

15. Lossov K. K., Malinnikov V. A. (2025). Development of a methodology for using Haralick features to detect upwelling zones on the ocean surface based on satellite imagery //*Monitoring. Nauka i tehnologii [Monitoring. Science and Technologies]* 2025. № 4 (66), pp. 21–30 [in Russian].

Об авторах

Константин Константинович Лоссов – аспирант.

Василий Александрович Малинников – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой космического мониторинга и экологии.

Author details

Konstantin K. Lossov – PhD Student.

Vasily A. Malinnikov – DSc, Professor, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology.

Получено / Received 10.06.2026
Поступила после рецензирования / Revised 24.08.2026
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026

Научно-практическая статья/ Research article
УДК [528.44:528.852.8]+004
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-74-80

Автоматическая идентификации объектов недвижимости с использованием спутниковых данных и отечественного программного обеспечения

Т. А. Хлебникова [1]✉, О. А. Опритова [1], А. Ш. Гулиев [2]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку, Азербайджанская Республика

e-mail: t.a.hlebnikova51@gmail.com

Аннотация. В настоящее время интенсивность процессов урбанизации территорий постоянно повышается, увеличивается число зданий и сооружений, площади зеленых насаждений сокращаются. В статье рассмотрены результаты исследований использования материалов космических съемок для оперативного выявления объектов, имеющих признаки нарушения требований земельного законодательства, а также для оценивания динамики зеленых насаждений городской территории на примере анализа участка территории Октябрьского района г. Новосибирска. Исследования выполнялись с использованием разновременных космических снимков со спутников World View-4 средствами «Комплекса автоматического распознавания и векторизации «Panorama Vision», входящего в состав отечественного программного продукта ГИС «Панорама». Результаты экспериментальных исследований по обработке разновременных космических снимков показали возможность реализации такого подхода для мониторинга недвижимого имущества.

Ключевые слова: материалы дистанционного зондирования, многозональные оптические снимки, автоматическое дешифрирование, объекты недвижимого имущества, зеленые насаждения, искусственный интеллект, модель нейронной сети, ГИС «Панорама»

Для цитирования:
Хлебникова Т. А., Опритова О. А., Гулиев А. Ш. Автоматическая идентификации объектов недвижимости с использованием спутниковых данных и отечественного программного обеспечения. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 74–80. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-74-80

A framework for automated real estate object detection using high-resolution satellite imagery and indigenous GIS software

T. A. Khlebnikova[1]✉, O. A. Opritova[1], A. Sh. Guliyev[2],

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, The Republic of Azerbaijan

e-mail: t.a.hlebnikova51@gmail.com

© Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова, А. Ш. Гулиев, 2026

Abstract. Amidst accelerating urbanization, the proliferation of built-up areas and the concomitant reduction of urban green spaces present critical challenges for sustainable land management. The study evaluates the efficacy of spaceborne remote sensing for two primary objectives: the rapid detection of unauthorized construction and land-use violations, and the quantitative assessment of urban vegetation dynamics. The Oktyabrsky District of Novosibirsk serves as the pilot study area. The methodology relies on the spatiotemporal analysis of multi-temporal satellite imagery acquired by the WorldView-4 sensor. Data processing was executed using the "Panorama Vision" automated recognition and vectorization toolkit, embedded within GIS "Panorama" software package. Experimental results confirm the viability of this framework for automated real estate monitoring.

Keywords: remote sensing data, multi-spectral optical images, automatic interpretation, real estate, green spaces, artificial intelligence, neural network model, GIS Panorama

For citation:
Khlebnikova T. A., Opritova O. A., Guliyev A. Sh. (2026). A framework for automated real estate object detection using high-resolution satellite imagery and indigenous GIS software. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 74–80. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-74-80

Введение

Современная государственная политика в области управления имуществом все больше опирается на принципы цифровизации, что особенно важно в контексте федерального закона № 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости» и необходимости создания единой цифровой среды для учета объектов (О государственной регистрации недвижимости»: федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 218-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru. – Текст : электронный).

При выполнении работ по инвентаризации земель перечень исходных документов включает в себя сведения федеральных государственных и муниципальных информационных систем учета недвижимого имущества. В перечень последнего входят земельные участки, здания, сооружения, объекты незавершенного строительства. В настоящее время инвентаризация земель, выявление признаков нарушения требований земельного законодательства осуществляются разными методами и в большей степени визуальным осмотром и инструментальными обследованиями [1]. При этом ручная обработка больших массивов пространственных данных остается одним из узких мест, замедляющих процессы контроля, планирования и мониторинга.

По оперативности и эффективности на первый план выходят методы, основанные на обработке материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) средствами автоматизированного дешифрирования изображений аэрокосмических съемок.

Анализ литературных источников показал, что в научной литературе много работ, посвященных технологиям с использованием материалов аэрокосмических съемок, и методов автоматизированного дешифрирования для выявления объектов интереса. Публикаций, посвященных развитию технологий автоматического дешифрирования для оперативного выявления объектов, имеющих признаки нарушения требований земельного законодательства, недостаточно [1].

Анализ источников литературы [2–10] показывает, что методы обработки ДЗЗ претерпели качественные изменения: от простой спектральной интерпретации к сложным алгоритмам автоматизированных систем. В рамках экологического мониторинга исследования [7–10] используют непараметрическую статистику [7], трехмерное моделирование объектов урбанизированных территорий [10] и сочетание географических данных с оценкой экономического ущерба [8], что подтверждает высокую информативность ДЗЗ при оценке динамики территорий ландшафта.

Методики и программы автоматизированного дешифрирования космических изображений дают неплохие результаты распознавания пород деревьев и растительности, при этом алгоритмы решений имеют недостатки

[6, 9]. Большинство из них либо разработаны под узкие задачи, либо функционируют на зарубежных платформах. Это затрудняет массовое использование их в России.

В настоящее время регулирование землепользования не имеет системы, способной автоматически и незамедлительно выявлять незаконное использование земель и объектов, поэтому проектирование методов обработки спутниковых изображений имеет важное значение для повышения эффективности мониторинга, требующего в отношении землепользования интеграции статистического анализа [7], автоматического распознавания [6, 9] объектов и технологий пространственного моделирования [10].

В этой связи целью данной статьи ставилась задача разработки методики автоматического выявления объектов разных видов и оценки динамики площадей зеленых насаждений с использованием отечественного программного обеспечения «Комплекс автоматического распознавания и векторизации Panorama Vision», входящего в состав ГИС «Панорама» (АО КБ «Панорама») [11].

Методы и материалы

Комплекс автоматического распознавания и векторизации Panorama Vision (далее – Panorama Vision) разработан для автоматического дешифрирования объектов по материалам дистанционного зондирования Земли. В перечень таких материалов входят космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения, аэрофотоснимки и снимки, полученные при съемке с беспилотных воздушных судов (БВС). Есть возможность подключения геопорталов для выбора спутниковых снимков.

Panorama Vision имеет клиент-серверную архитектуру [12]. Оформление заявки на дешифрирование осуществляется в клиентском модуле. Его средствами пользователь выбирает либо все изображение, либо его часть, назначает модель нейронной сети распознаваемых данных (лес, строения, транспорт, водоемы и другие) на загруженных снимках. Серверная часть выполняет проверку наличия лицензии пользователя, обработку изображения, включая создание растровых масок объектов по растровым изображениям поверхности, векторизацию границ полученных масок. Серверная часть Panorama Vision включает методы искусственного интеллекта, в которых реализована семантическая сегментация изображений.

В качестве исходных данных для исследований использованы фрагменты архивных снимков территории Октябрьского района г. Новосибирска с площадью покрытия порядка 6 км^2 оптико-электронной многоспектральной съемки спутника World View-4.

Технические характеристики съемочной аппаратуры этого спутника позволяют получать изображения местности в следующих каналах: PAN+RGB+NIR, в панхроматическом режиме с разрешением от 0,3 до 0,5 м и в мультиспектральном (4 канала, синий, зеленый, красный и ближний ИК) с разрешением от 1,2 до 1,8 м [13].

Методика выполнения исследований включала следующие этапы:

– подготовительные работы (ориентирование снимков с использованием координат и высот опорных точек, загрузка растровых изображений);

– оформление заявки на автоматическое дешифрирование (выбор части или всего изображения, доступной модели нейронной сети);

– отправка заявки на серверный модуль по сети Интернет;

– анализ информации этапов выполнения заявки;

– анализ и редактирование результатов автоматического дешифрирования, векторизация границ пропущенных объектов, удаление ложно опознанных объектов в ручном режиме;

– анализ полученных результатов на предмет выявления признаков нарушения требований земельного законодательства.

Обсуждение и результаты

Интерфейс программы не предусматривает задание и изменение каких-либо значений настроек, кроме области обрабатываемой территории и модели нейронной сети. С одной стороны, это облегчает работу пользова-

теля, с другой – нет возможности улучшить результат в процессе обработки. Результат работы Panorama Vision – слой векторной карты с распознанными объектами. Время обработки и получения результата зависит от скорости интернета и выбранной модели нейронной сети. Площадь обрабатываемых снимков составляла от 5,2 до 6,9 км^2. Среднее время обработки для моделей (строения, лес, гидрография, дороги) – от 20 с до 1,5 мин.

Результаты автоматического распознавания зданий, лесных насаждений, дорог, гидрографии показаны на рис. 1–4. Границы объектов выделены розовым цветом. В таблице приведены значения достоверности распознавания объектов на исследуемой территории на основе визуального сравнения их с изображением на снимках. Значения достоверности и буква Л со знаком плюс «+Л» обозначают, что к достоверно опознанным объектам добавились ложные.

Анализ результатов позволил сделать выводы о достоверности и применимости Panorama Vision для разных объектов. Лучший результат был при распознавании зданий и сооружений. Достоверность распознавания менялась в зависимости от года съемки, возможно, из-за сезонных изменений или особенностей местности. Данные 2020, 2024 гг. показали достоверность 92–94 %. Для других лет показатели были ниже: 87 % в 2006 и 90 % в 2009 гг., 50 % в 2005 г. и 90% в 2010 г. Такие значения достоверности говорят о том, что комплекс Panorama Vision можно использовать для учета и контроля недвижимости, а также для обнаружения объектов незавершенного строительства или незаконных построек путем сравнения полученных результатов с официальными планами. Векторные границы зданий, полученные Panorama Vision, могут использоваться для дальнейшей проверки и инвентаризации.

Вторая часть исследований – оценка динамики площадей зеленых насаждений – выявила трудности. При распознавании лесных участков практически на всех изображениях имело место ложное распознавание: участки травяной растительности и газоны принимаются за лес. Это не позволило проследить динамику площадей зеленых насаждений.

Рис. 1. Изображение фрагмента снимка 09-2020 с результатами автоматического распознавания строений

Рис. 2. Изображение фрагмента снимка 09-2020 с результатами автоматического распознавания дорог

Рис. 3. Изображение фрагмента снимка 06-2010 с результатами автоматического распознавания леса, гидрографии

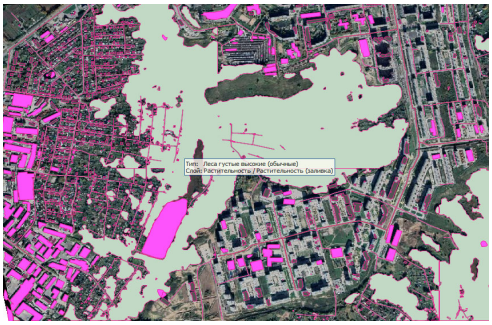


Рис. 4. Изображение фрагмента снимка 09-2020 с результатами комплексной обработки

Результаты обработки изображений

Модель нейронной сети	Изображение (месяц и год съемки)					
	Сентябрь 2005	Сентябрь 2006	Июнь 2009	Июнь 2010	Сентябрь 2020	Апрель 2024
	%					
Лес	80	70–80	70 + Л	70 + Л	60 + Л	50–60
Здания	50	87	90	87	92	94
Дороги	85	95	95	95	95	85
Гидрография	70 + Л	70 + Л	100	100	100	100 + Л
Транспортные средства	10	10	10	10	10	10
Комплексная обработка	60	60	70	70	60	60

Модель распознавания гидрографии (водоемов) дала разные результаты. На временных срезах за 2009, 2010, 2020, 2024 гг. модель показала достоверность, равную 100 %. На более ранних снимках за сентябрь 2005, 2006 гг. модель дала ложные распознавания объектов гидрографии, и достоверность модели упала. Модель могла показать ошибочные результаты из-за различных факторов: изменение уровня воды, наличие льда, изменение цветовой палитры, изменение освещенности в разные сезоны и годы, а также качество снимка.

Распознавание дорог показывает высокую достоверность – от 85 до 95 %, но, как и распознавание гидрографии, иногда имеет место ложный результат. Распознавание транспортных средств показало лишь около 10 % достоверности на всех обрабатываемых снимках. Такой уровень делает функцию распознавания малополезной для контроля парковки и движения транспорта. Модель «комплексной обработки» показала низкую и меняющуюся точность – от 60 до 70 %.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований по применению «Комплекса автоматического распознавания и векторизации Panorama Vision» для автоматического выявления объектов подтвердили возможность его использования для контроля и учета недвижимого имущества (строений в большей степени). Использование материалов ДЗЗ и отечественного программного обеспечения позволит повысить достоверность данных, сократить сроки обработки материалов, а также удешевить и ускорить процессы учета и мониторинга состояния имущества. Panorama Vision успешно решает задачу предоставления доступа к технологиям автоматического дешифрирования широкому кругу пользователей без углубленных технических знаний. Его скорость и простота использования являются явными преимуществами для оперативного мониторинга.

Рекомендуется внедрение данной методики в работу органов муниципальных образований для повышения прозрачности, оперативности администрирования государственной и муниципальной собственности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гура Д. А., Марковский И. Г., Ряскин А. А. Использование беспилотных авиационных систем в осуществлении государственного земельного надзора. Вестник СГУГиТ. 2022. № 27 (5). С. 138–146. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-138-146.

2. Алексеев Д. К., Бабин А. В., Саргаева В. Ю. Динамика зеленых насаждений Санкт-Петербурга по данным дистанционного зондирования. Экология. Экономика. Наука. Сер. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2021. № 2 (6). С. 38–41.

3. Трубина Л. К., Лисакова О. А., Хлебникова Т. А. Зеленая инфраструктура как инструмент устойчивого развития урбанизированных территорий. Вестник СГУГиТ. 2023. № 5 (31). С. 140–150.

4. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Исследование возможностей обработки радарных и многозональных космических снимков земной поверхности. Вестник СГУГиТ. 2022. № 27 (2). С. 102–114. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114.

5. Cavayas F., Ramos Y., Boye A. Inventory of urban green spaces and their monitoring using WorldView-2. Geomatics. 2011. No. 3. P. 67–73.

6. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Хлебникова Е. П., Арбузов С. А., Алтынцев М. А., Гордиенко А. С., Гук А. А. Разработка методов автоматической интерпретации спутниковых снимков. Интерпретационные признаки изображений объектов по мультиспектральным спутниковым данным. Геодезия и картография. 2013. № 7. С. 31–40.

7. Алтынцев М. А., Шляхова М. М. Исследование статистических свойств спектральных характеристик растительности. Непараметрический подход. Вестник СГУГиТ. 2019. № 24 (4). С. 58–69.

8. Гордиенко А. С., Кулик Е. Н. Данные дистанционного зондирования Земли при оценке эколого-экономического ущерба от нефтяного загрязнения. Вестник СГУГиТ. 2021. № 26 (2). С. 37–46.

9. Арбузов С. А., Хлебникова Е. П., Никитин В. Н. Автоматизированная идентификация и определение породного состава древесных растений по материалам цифровой многозональной аэросъемки лесных массивов. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 4. С. 68–76. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-68-76.

10. Трубина Л. К., Хлебникова Т. А., Николаева О. Н. Методические подходы к созданию 3D-моделей для исследования экологического состояния городских территорий. География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 199–205.

11. ГИС Панорама. Технологии [Электронный ресурс]. М. : ГИС-Инфо, 2023. URL: https://gisinfo.ru/support/tehno.htm (дата обращения: 24.03.2026).

12. Комплекс автоматического распознавания и векторизации «Panorama Vision» [Электронный ресурс]. М. : ГИС-Инфо. URL: https://gisinfo.ru/products/panvision.htm (дата обращения: 24.03.2026).

13. Техническая информация данных компании Digital Globe [Электронный ресурс]. URL: https://www.digitalglobe.com/resources/technical-information (дата обращения: 11.07.2025).

REFERENCES

1. Gura, D. A., Markovsky, I. G., Ryaskin, A. A. (2022) Use of Unmanned Aerial Vehicles in the Implementation of State Land Supervision" *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT*], 27(5), Pp. 138-146. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-138-146 [in Russian].

2. Alexeev, D. K., Babin, A. V., & Sargaeva, V. YU (2021) Dinamic of green spase in Petersburg accoding to remote sensing data. *Ecology.Economics Science Series:Geoinfomation Technologies and Space Monitoring.* V/2, 6. Pp. 38–41.

3. Trubina, L. K., Lisakova, O. A., Khlebnikova, T. A. (2023). Green infrastructure as a tool for sustainable development of urbanized territories. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 5(31), pp.140 – 150 [in Russian].

4. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2022). Investigation of the possibilities of processing radar and multi-zone space images of the underlying surface. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT*], 27(2), 102–114. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114 [in Russian].

5. Cavayas, F., Ramos, Y. Boye A Inventory of urban green spaces and their monitoring using WorldView-2 *Geomatics.* 2011, No. 3. P. 67-73.

6. Guk, A. P., Evstratova L. G., Hlebnikova, E. P., Arbuzov, S. A., Altynzev, M. A.,Gordienko, A. S., Guk, A. A. (2013). Development of methods for automated interpretation of satellite images. Interpretation signs of images of objects on multispectral satellite data. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography],* 7, pp. 31–40 [in Russian].

7. Altyntsev M. A., Shlyahova M. M. (2019). Investigation of statistical properties of spectral characteristics of vegetation. Non-parametric approach. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 24(4) pp. 58–69. [in Russian].

8. Gordienko, A. S., & Kulik E. N. (2021). Data of remote sensing of the earth in assessing environmental and economic damage from oil pollution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT*], 26(2), pp. 37–46 [in Russian].

9. Arbuzov, S. A., Khlebnikova, E. P. Nikitin, V. N. (2020) Automated identification and determination of the breed composition of wood by materials of digital multispectral aerial survey of forests. */Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT*], 25(4), pp. 68–76. [in Russian].

10. Trubina, L. K., Khlebnikova, T. A. & Nikolaeva, O. N. (2017). Methodological approaches to developing 3D models for investigating the ecological status of urban territories. *Geografia and Natural resources[Geografia and Natural resources],* V2, pp.199–205 [in Russian].

11. GIS Panorama. Technologies. Retrieved from https://gisinfo.ru/support/tehno.htm. (access March, 24,2026).

12. Panorama Vision Automatic Recognition and Vectorization Complex. Retrieved from https://gisinfo.ru/products/panvision.htm. (access March 24, 2026).

13. Technical information from DigitalGlobe. Retrieved from https://www.digitalglobe.com/resources/technical-information.(access March 11, 2025)

Об авторах

Татьяна Александровна Хлебникова – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной геодезии и горного дела.

Ольга Анатольевна Опритова – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Аловсат Шура оглы Гулиев – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры геоматики.

Author details

Tatyana A. Khlebnikova – DSc, Professor, Department of Applied Geodesy and Mining.

Olga A. Opritova – PhD, Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Alovsat Shura oglu Guliyev – PhD, Senior Lecturer, Department of Geomatics.

Получено / Received 04.05.2026
Поступила после рецензирования / Revised 07.09.2026
Принята к публикации / Accepted 15.09.2026

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 528.9
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-81-91

От карты к когнитивной модели: эволюция геопространственных представлений в эпоху цифровых двойников

А. О. Лебзак[1]✉, Е. В. Лебзак[1], С. С. Янкелевич[1]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: a.o.lebzak@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается эволюция геопространственных представлений от традиционных карт до когнитивных моделей, интегрированных в парадигму цифровых двойников. Приводится сравнительный анализ традиционных карт (аналоговых и цифровых), геоинформационных систем (ГИС) и геопространственных цифровых двойников (ГЦД) как трех поколений геопространственных моделей. Проанализированы их сущностные различия, касающиеся динамики, типов данных, элементов содержания, основных функций, взаимодействия с пользователем, а также временной аспект, обновление данных и отношение к геопространственным знаниям. Выявленные различия свидетельствуют о смене фундаментальных принципов организации геопространственных моделей и необходимости пересмотра устоявшихся научных категорий в картографии и геоинформатике. Прослеживается эволюция роли ГИС от инструмента пространственного анализа к интеграционной платформе для создания семантически насыщенных, самообучающихся моделей. Особое внимание уделено возрастающей роли геопространственных знаний как системообразующего элемента цифровых двойников местности, превращающего их из трехмерных моделей в когнитивные системы, предназначенные для анализа, прогнозирования и поддержки принятия решений. Обосновывается утверждение, что ГЦД не является усовершенствованной картой или ГИС, а представляет собой принципиально новый класс геоинформационных продуктов – динамические имитационные системы, для которых картографическое представление служит лишь одним из интерфейсов взаимодействия.

Ключевые слова: геопространственные модели, геопространственный цифровой двойник, геопространственные знания, когнитивные модели, ГИС, эволюция геопрастранственных представлений, картографические произведения, 3D-модель

Для цитирования:
Лебзак А. О., Лебзак Е. В., Янкелевич С. С. От карты к когнитивной модели: эволюция геопространственных представлений в эпоху цифровых двойников. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 81–91. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-81-91

© А. О. Лебзак, Е. В. Лебзак, С. С. Янкелевич, 2026

From cartographic representation to cognitive modeling: the evolution of geospatial paradigms in the age of digital twins

A. O. Lebzak[1✉], *E. V. Lebzak*[1], *S. S. Yankelevich*[1]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: a.o.lebzak@mail.ru

Abstract. The article examines the evolution of geospatial representations from traditional cartographic products to cognitive models embedded within the digital twin paradigm. A comparative analysis is conducted across three generations of geospatial modeling: traditional maps, geographic information systems (GIS), and geospatial digital twins (GDT). Fundamental distinctions among these paradigms are analyzed with respect to dynamism, data typology, content structure, core functionalities, user interaction modalities, temporal dimensions, data update mechanisms, and their epistemological relationship to geospatial knowledge. The identified differences reveal a paradigmatic shift in the foundational principles governing geospatial model organization, necessitating a critical reassessment of established scientific categories in cartography and geoinformatics. The evolving role of GIS is traced from its origins as a spatial analysis tool to its current function as an integration platform for semantically enriched, self-learning models. Particular emphasis is placed on the increasingly central role of geospatial knowledge as a constitutive element of geospatial digital twins, transforming them from static three-dimensional representations into cognitive systems capable of analysis, forecasting, and decision support. It is argued that a GDT does not represent a mere enhancement of traditional maps or GIS but constitutes a fundamentally new class of geoinformation product – dynamic simulation systems in which cartographic visualization serves as one of multiple interaction interfaces.

Keywords: geospatial models, geospatial digital twin, geospatial knowledge, cognitive models, GIS, evolution of geospatial concepts, cartographic works, 3D models

For citation:
Lebzak A. O., Lebzak E. V., Yankelevich S. S. (2026) From cartographic representation to cognitive modeling: the evolution of geospatial paradigms in the age of digital twins. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 81–91. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-81-91

Введение

Современный этап развития геоинформационных технологий характеризуется стремительным распространением концепции цифровых двойников в самых разных сферах – от управления городскими территориями до мониторинга природных процессов и сохранения объектов культурного наследия.

Геопространственные цифровые двойники позволяют интегрировать данные дистанционного зондирования, информационного моделирования зданий (BIM), сенсоров (IoT) и искусственного интеллекта (AI) для пространственного анализа, моделирования и поддержки принятия решений.

Следует отметить, что интенсивное развитие и внедрение ГЦД сопровождается нарастающей терминологической и концептуальной неопределенностью, которая заключается в том, что в научной литературе, проектной документации и нормативно-правовых актах цифровые двойники местности нередко отождествляются с трехмерными картами, динамическими атласами или «продвинутыми» ГИС-продуктами. Все это не только искажает сущность новой технологии, но и препятствует формированию методологической базы для создания, оценки и использования ГЦД. Отсюда возникает закономерный вопрос: является ли ГЦД эволюционным продолжением картографического произведения или же представляет собой принципиально новый класс геоинформационных продуктов, требующий пересмотра устоявшихся научных категорий?

В настоящее время в научной литературе системные исследования, сравнивающие ГЦД с картами и ГИС, остаются немногочисленными. Недостаточно проработанным остается вопрос о критериях, позволяющих разграничить эти явления, а также о том, какую роль играют геопространственные знания и какие методологические принципы их организации лежат в основе создания ГЦД как когнитивных систем. Исследование подразумевает решение этих проблем.

Цель статьи заключается в анализе эволюции геопространственных представлений от традиционной карты к когнитивной модели, реализуемой в архитектуре цифровых двойников, определении роли современных геоинформационных технологий в этом процессе и места геопространственных знаний в новой парадигме.

Для достижения поставленной цели были решены такие задачи как:

– анализ сущности картографических произведений, ГИС-продуктов и геопространственных цифровых двойников;

– разработка системы критериев для сравнительного анализа трех поколений геопространственных моделей;

– выявление качественных различий между ГЦД и предшествующими классами картографических и геоинформационных продуктов, что позволило обосновать тезис о парадигмальном сдвиге;

– определение роли ГИС и геопространственных знаний в ГЦД.

Методы и материалы

В ходе исследования применялись методы сопоставления, анализа и синтеза. Теоретическую основу работы составляют труды отечественных и зарубежных ученых, касающиеся современных разработок в области картографии, геоинформатики, теории цифровых двойников, когнитивных наук, а также геопространственных знаний.

Чтобы выявить качественные различия между картами, ГИС и ГЦД, рассматриваемыми в качестве трех поколений геопространственных моделей, был выполнен их сравнительный анализ.

В классической картографии карта понимается как образно-знаковая модель действительности, предназначенная для передачи пространственной информации [1]. Картографическое произведение выступает прежде всего как результат – зафиксированное на определенный момент времени отображение территории, передающее знания от картографа пользователю [2].

В исследовании картографические произведения анализируются в широком смысле, включая как их аналоговые (например, бумажные карты), так и цифровые формы (например, веб-карты, мультимасштабные карты и цифровые топографические карты).

Ключевые признаки картографического произведения, которые чаще всего встречаются в научной литературе:

– статичность – карта фиксирует состояние территории на момент создания, не предусматривая автоматического обновления;

– генерализованность – картографическое произведение подверглось целенаправленному обобщению и отбору содержания в соответствии с масштабом и назначением;

– условность – для кодирования пространственной информации на карте использована система условных обозначений;

– коммуникативность – карта служит средством передачи знаний от картографа к пользователю через систему условных знаков;

– материальная форма – картографическое произведение существует на физическом носителе (бумажном или цифровом) как законченное произведение [1, 3–6].

Л. К. Радченко и О. Н. Николаева, исследуя познавательный аспект картографии, выделяют два уровня работы с картой: чувственное восприятие (зрительный охват территории) и рациональное познание (чтение легенды, сопоставление, анализ) [6]. Результатом этого процесса выступает новое знание о регионе, формирующееся в сознании пользователя, однако сама карта остается при этом неизменной.

Е. С. Антонов, вводя понятие «геокогнитивные карты», отмечает, что цифровая трансформация расширяет возможности кар-

тографических произведений, позволяя интегрировать в них элементы знаний и алгоритмы анализа [4]. Однако даже интерактивные и анимированные карты все еще остаются в парадигме «отображения», поскольку их динамика обеспечивается за счет изменения масштаба, слоев или анимации заранее рассчитанных состояний, но не за счет самостоятельного моделирования процессов.

Следующим этапом в развитии геопространственных моделей стали геоинформационные системы.

В отличие от картографических произведений, которые представляют собой конечный результат, под ГИС понимается «информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, анализ и визуализацию пространственных данных» [7]. Однако в исследовании ГИС рассматривается не как программное обеспечение, а как законченный продукт (например, ГИС лесного хозяйства), представляющий собой структурированное информационное пространство.

В источниках [7–9] встречаются следующие признаки, характеризующие ГИС:

– интеграция данных – объединение пространственных и атрибутивных данных в единой базе;

– интерактивность – возможность формировать запросы, выполнять анализ, создавать производные карты;

– версионность – поддержка актуальных и архивных версий данных;

– инструментальность – наличие средств для извлечения знаний из данных через пространственный анализ и статистические вычисления.

Несмотря на то что современные ГИС-продукты активно используются в системах «умных городов», для защиты критической инфраструктуры и экологического мониторинга [10, 11] ГИС ориентированы преимущественно на хранение и анализ статических данных, тогда как современные задачи управления территориями требуют перехода к динамическому моделированию [12].

Важное различие ГИС-продуктов и картографических произведений: карта передает знания, а ГИС предоставляет инструментальную среду для извлечения знаний из данных [4]. Это различие имеет принципиальное значение для построения эволюционной линии геопространственных моделей.

Переход на следующий эволюционный этап развития геопространственных моделей произошел благодаря осмыслению природы цифровых двойников и их роли в познании и моделировании территории. Роб Китчин и Оливер Докинс ввели концепцию пост-репрезентационного картографирования, утверждая, что цифровые двойники создают качественно новую реальность – «диадическое переплетение карты и территории». Под геопространственным цифровым двойником они понимают «динамическую, интерактивную, мультимодальную модель территории, синхронизированную с реальным миром через сеть сенсоров и способную к имитационному моделированию» [13].

В отличие от традиционной карты, представляющей собой отображение территории, цифровой двойник становится ее частью: он синхронизирован с ней в реальном времени, получает данные от датчиков и может воздействовать на реальные процессы.

Можно выделить следующие признаки ГЦД, которые встречаются в научной литературе [14–18]:

– динамическая синхронизованность – двусторонняя связь между физическим объектом и его виртуальной моделью (ГЦД), при которой виртуальная модель изменяется во времени, отражая изменения в реальном мире;

– интеграция разнородных данных – объединение данных различных типов из множества источников (пространственные данные, BIM-модели, потоковые данные с датчиков и пр.);

– наличие операциональной модели – не только отображение текущего состояния, но и способность моделировать процессы, прогнозировать развитие ситуаций и имитировать различные сценарии;

– двусторонее взаимодействие – возможность воздействия на физический объект через рекомендации лицам, принимающим решения, или через автоматизированные системы управления территорией;

– семантическая совместимость – способность обеспечивать взаимопонимание между разнородными данными на основе формализованных онтологий.

Ключевое отличие цифрового двойника от предшествующих геопространственных продуктов заключается в его способности не просто хранить и анализировать данные, но и ге-

нерировать новые знания путем моделирования и составления прогнозов. Т. В. Сукманова и Н. С. Белов в своей статье указывают на то, что «в отличие от простой базы данных, цифровой двойник обладает операциональной моделью, обеспечивающей интерпретацию и использование данных для решения конкретных задач» [19]. Именно наличие поведенческих моделей отличает цифрового двойника от трехмерной карты [15].

На основе проведенного анализа сущности картографических произведений, ГИС-продуктов и ГЦД были выявлены следующие критерии, позволяющие провести сравнительный анализ трех поколений геопространственных моделей:

– природа модели – характеризует онтологический статус объекта, т. е. представляет ли он собой отображение действительности, инструмент для работы с данными или же является динамической системой, способной к симуляции и воздействию на физические объекты;

– тип динамики – определяет характер изменения модели во времени (статичность, интерактивность, анимация заранее рассчитанных состояний или симуляция процессов в режиме реального времени);

– типы данных – описывают номенклатуру данных, с которыми работает геопространственная модель;

– содержание геопространственного продукта – представляет собой совокупность элементов, из которых состоит продукт, а также принципы их организации;

– основная функция – определяет целевое назначение объекта (отображение, учет, анализ, моделирование, прогнозирование, поддержка принятия решений и т. п.);

– взаимодействие с пользователем – определяет характер связи между геопространственной моделью и пользователем (одностороннее, интерактивное или двустороннее взаимодействие);

– научная основа – характеризует дисциплинарную принадлежность геопространственной модели (картография, геоинформатика, системный анализ, искусственный интеллект и т. п.);

– временной аспект – характеризует отношение геопространственной модели ко времени (фиксация состояния на определенный временной срез, версионность, моделирование прошлого, настоящего и будущего в единой динамической среде);

– актуализация данных – определяет периодичность обновления содержания геопространственной модели (дискретное, которое подразумевает выполнение полевых работ и/или камеральной обработки, периодическое или непрерывное);

– отношение к геопространственным знаниям – описывает, как объект оперирует геопространственными знаниями (передача знаний от картографа пользователю, инструментальная среда для извлечения знаний из данных, формирование новых знаний посредством моделирования и использования формализованных знаний).

Результаты

Для выявления качественных различий между ГЦД и предшествующими классами картографических и геоинформационных моделей на основе разработанной системы критериев была составлена таблица.

Сравнительный анализ трех поколений геопространственных моделей

Критерий	Картографическое произведение	ГИС-продукт	Геопространственный цифровой двойник
Природа геопространственной модели	Семиотическая модель	Информационная система с базой пространственных и атрибутивных данных	Динамическая имитационная модель, имеющая двустороннюю связь с физическими объектами
Тип динамики	Отсутствует или интерактивность	Интерактивность	Симуляция
Типы данных	Пространственные, реже пространственно-атрибутивные	Пространственно-атрибутивные	Гетерогенные

Окончание таблицы

Критерий	Картографическое произведение	ГИС-продукт	Геопространственный цифровой двойник
Содержание	Картографическое изображение, легенда, зарамочное оформление	Пространственные данные (векторные, растровые), базы атрибутивных данных, запросы, отчеты, производные карты	Интегрированная модель, содержащая геометрический каркас, семантические и потоковые данные, а также поведенческие модели
Основная функция	Отображение, навигация, получение информации и знаний, визуальный анализ, а также принятие решений (только на основе геокогнитивных карт)	Учет, регистрация, управление объектами, пространственный анализ, формирование отчетности	Моделирование сценариев, прогнозирование, поддержка управленческих решений
Тип взаимодействия	Пассивное (чтение, измерение по карте, получение знаний)	Интерактивное (запросы к базе данных, аналитика, формирование выборок)	Двустороннее (получение данных из реальности, воздействие на реальность через рекомендации или автоматизированные системы)
Научная основа	Картография	Геоинформатика	Системный анализ и искусственный интеллект, геоинформатика
Временной аспект	Фиксирует состояние территории на момент создания	Оперирует актуальными и архивными данными, поддерживает версионность	Моделирует прошлое, настоящее и будущее в единой динамической среде
Актуализация данных	Дискретное (после полевых работ и/или камеральной обработки; новая карта – новый продукт), периодическое (например, цифровые топографические планы)	Периодическое	Непрерывное или приближенное к реальному времени; синхронизация с IoT-датчиками и оперативными источниками
Отношение к геопространственным знаниям	Передача формализованных знаний от картографа к пользователю	Инструментальная среда для извлечения знаний из данных	Формирование новых знаний через симуляцию и прогноз, использование формализованных знаний (онтологии) как основы интеграции

В результате проведенного анализа был сделан вывод о том, что ГЦД является не просто геопроостранственной моделью, а функциональной частью действительности. Картографическое произведение фиксирует и передает пространственную информацию, ГИС-продукт позволяет выявить закономерности в данных, а ГЦД дает возможность не только понять и предсказать, но и влиять на объекты реального мира.

В классической картографии человек – интерпретатор, который, читая карту, извлекает из нее информацию и знания, в ГИС человек – аналитик, формирующий запросы

и строящий модели, а в ГЦД человек становится партнером, которому система предоставляет прогнозы и рекомендации, а он принимает решения, которые могут быть реализованы через системы автоматизированного управления.

Выявленные качественные различия охватывают все сущностные характеристики геопространственных продуктов – природу модели, тип динамики, типы данных, основную функцию, взаимодействие с пользователем, временной аспект и пр.

Совокупность этих различий образует сдвиг парадигмы – смену фундаментальных принципов организации геопространственных моделей. Этот сдвиг может быть охарактеризован как переход:

– от репрезентации к переплетению;
– статики к операциональности;
– интерактивности к симуляции;
– однородности к гетерогенности;
– отображения к управлению;
– пассивности к двунаправленности;
– передачи/извлечения знаний к их формированию;
– ретроспекции к проспекции.

Все это свидетельствует о необходимости пересмотра устоявшихся научных категорий в картографии и геоинформатике.

Очевидно, что цифровой геопространственный двойник не является исключительно геоинформационным продуктом, он представляет собой интеграционную и расширяющую эту сферу технологию. Таким образом, можно сделать вывод, что ГЦД не является эволюционным продолжением картографического произведения или ГИС-продукта. Он представляет собой принципиально новый класс геоинформационных моделей, для которого картографическое отображение служит лишь одним из интерфейсов, но не сущностным ядром.

ГЦД должен быть квалифицирован не как разновидность картографического произведения или ГИС-продукта, а как когнитивная геопространственная система – новый класс объектов, требующий разработки собственной теории, методологии и нормативной базы.

При этом ГИС выступает в роли пространственного фундамента и системообразующего элемента ГЦД, который, в свою очередь, надстраивает над ними дополнительные функциональные уровни (рисунок). Поэтому ГЦД представляет собой не замену ГИС, а ее функциональное расширение и качественное преобразование в когнитивную систему.

ГИС в структуре ГЦД обеспечивает:

– пространственный каркас – единую систему координат и пространственную привязку всех данных;
– интеграцию гетерогенных данных – объединение BIM, IoT, статистики и других источников в едином пространственном контексте;
– пространственный анализ – выявление закономерностей и взаимосвязей, недоступных при изолированном рассмотрении данных;
– визуализацию и иммерсивное взаимодействие – переход от плоских карт к интерактивным 3D-средам;
– прогнозное моделирование – сценарный анализ и поддержку управленческих решений;
– операционную синхронизацию – непрерывное обновление модели в реальном времени.

Таким образом, без ГИС-основы цифровой двойник территории теряет свою геопространственную сущность, превращаясь в набор разрозненных 3D-моделей, не связанных единым пространственным контекстом.

В российской научной литературе появляются работы [14, 19, 20], развивающие методологию создания цифровых двойников на основе ГИС-подходов. В работе [14] предложен метод многоаспектного геоинформационного моделирования, позволяющий создать иерархическую систему цифровых двойников географических территорий. В рамках этого подхода в модель заносится лишь информация, определяющая территорию как систему, а остальные данные импортируются из ГИС через ссылки, что обеспечивает гибкость и масштабируемость.

Структура ГЦД

Такая архитектура создает принципиально новую возможность – геопространственная информация структурируется не как временной ряд, а играет роль контекста выполнения поведенческих сценариев [14]. Это наделяет цифровой двойник поведенческой функциональностью, позволяя пользователю не только идентифицировать пространственно-временную локализацию событий, но и понимать причинно-следственные механизмы, определяющие динамику системы.

При этом геопространственные знания в структуре ГЦД выполняют функцию семантического моста, позволяющего интегрировать данные из разных источников (например, ГИС и BIM), что является одной из ключевых методологических проблем при создании ГЦД. Они являются системообразующим элементом геопространственных цифровых двойников местности, превращающим их из трехмерных моделей в когнитивные системы, предназначенные для анализа, прогнозирования и поддержки принятия решений.

Заключение

В процессе исследования был выполнен анализ эволюции геопространственных представлений от традиционной карты к геопространственному цифровому двойнику. Сделан вывод о том, что ГЦД не является эволюционным продолжением картографического произведения или ГИС-продукта, а представляет собой принципиально новый класс геоинформационных моделей, для которого картографическое отображение служит лишь одним из интерфейсов, но не сущностным ядром.

ГЦД должен квалифицироваться не как разновидность картографического произведения или ГИС-продукта, а как когнитивная геопространственная система – новый класс объектов, требующий разработки собственной теории, методологии и нормативной базы.

Геопространственный цифровой двойник – это междисциплинарный научно-технический комплекс, который находится на стыке классической картографии, ГИС и современных цифровых технологий, значительно расширяющий их аналитические и прогностические возможности.

Выявленные качественные различия между ГЦД и предшествующими классами геоинформационных продуктов, охватывающие все сущностные характеристики, свидетельствуют о парадигмальном сдвиге и, как следствие, необходимости пересмотра устоявшихся научных категорий в картографии и геоинформатике.

Следует отметить, что ГЦД не является заменой геоинформационных систем. ГИС выступает в роли пространственного фундамента и системообразующего элемента ГЦД, который, в свою очередь, надстраивает над ними дополнительные функциональные уровни. Без ГИС-основы ГЦД теряет свою геопространственную сущность, превращаясь в набор разрозненных 3D-моделей, не связанных единым пространственным контекстом.

Особую роль в структуре ГЦД играют геопространственные знания – они являются системообразующим элементом геопространственных цифровых двойников местности, превращающим их из трехмерных моделей в когнитивные системы, предназначенные для анализа, прогнозирования и поддержки принятия управленческих решений.

Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть направлены на разработку методологии создания ГЦД, формализацию геопространственных знаний в виде онтологий, а также на решение проблем совместимости разнородных данных и стандартизации. Кроме того, внимания требует и вопрос правового статуса цифровых двойников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Салищев К. А. Картография. 3-е изд. перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1982. 271 с.

2. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий : монография. Новосибирск : СГГА, 2004. 260 с.

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

4. Антонов Е. С. Геокогнитивные карты и технологии – новый этап в картографии. Вестник СГУГиТ, 2020. Т. 25, № 2. С. 140–150. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-2-140-150.

5. Радченко Л. К., Николаева О. Н. Геопространственное моделирование региона как средство познания окружающего мира для широкого круга пользователей. Вестник СГУГиТ, 2024. Т. 29, № 2. С. 100–107. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-100-107.

6. Радченко Л. К., Николаева О. Н. Познавательный аспект в картографии: особенности рационального и чувственного познания при создании и использовании карт. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 3. С. 108–115. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-108-115.

7. Лурье И. К. Основы геоинформатики и создание ГИС ; под ред. А. М. Берлянта. Москва : ИНЭКС-92, 2002. 140 с.

8. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник. М. : Изд-во МГУ, 2008. 424 с.

9. Берлянт А. М. Геоинформатика : учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2010. 86 с.

10. Batty M. Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. Cambridge, MA : The MIT Press, 2005. 565 p.

11. Басаргин А. А. Разработка концепции моделирования и симуляции цифровых двойников городской территории для решения практических задач. Вестник СГУГиТ, 2024. Т. 29, № 4. С. 83–90. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-83-90.

12. De Smith M. J., Goodchild M. F., Longley P. A. Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools. 6th ed. London : The Winchelsea Press, 2018. 617 p.

13. Kitchin R., Dawkins O. Digital twins and deep maps. Transactions of the Institute of British Geographers. 2025. Vol. 50, no. 1. P. 1–7. DOI 10.1111/tran.12699.

14. Верхова Г. В., Акимов С. В., Присяжнюк А. С. Метод многоаспектного геоинформационного моделирования географического района. Информация и Космос. 2021. № 4. С. 32–39.

15. Beani E., Colucci E., La Riccia L., Lingua A.M. et al. The 3D Metric Survey for the Digital Cartographic Production to Support the Knowledge of the New Municipality of Mappano. Post Un-Lock. The Urban Book Series. Springer, Cham, 2023. P.153–168. DOI 10.1007/978-3-031-33894-6_12.

16. Bauer M. Towards Cognitive Digital Twins: A Review of Semantic Data Models for Built Environment. Buildings, 2024. Vol. 14, no. 7. P. 2216.

17. Ellul C., Stoter J. E., Bucher B. et al. Towards National Connected Digital Twins: A Geospatial Perspective. ISPRS Annals, 2024. Vol. X-4/W5-2024. P. 147–154. DOI 10.5194/isprs-annals-X-4-W5-2024-147-2024.

18. Jones D., Snider S., Nassehi A. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020. Vol. 29. P. 36–52. DOI 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

19. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Естественные науки, 2025. № 1. С. 40–57. DOI 10.5922/vestniknat-2025-1-3.

20. Волкова Т. А., Кузякина М. В., Карагян А. В., Ряскин А. А. Проблемы и перспективы создания цифровых двойников объектов культурного наследия Краснодарского края. Information and mathematical technologies in science and management, 2025. № 4 (40). С. 164–174. DOI 10.25729/ESI.2025.40.4.013.

REFERENCES

1. Salishchev, K. A. (1982). *Cartography [Kartografiya]*. Moscow: Higher school Publ., 271 p. [in Russian].

2. Karpik, A. P. (2004). *Methodological and Technological Foundations of Geoinformation Support for Territories [Metodologicheskie i tehnologicheskie osnovy geoinformacionnogo obespecheniya territorij]*. Novosibirsk: SGGA Publ., 260 p. [in Russian].

3. Berlyant, A. M. (2002). *Cartography [Kartografiya]*. Moscow: Aspect Press Publ., 336 p. [in Russian].

4. Antonov, E. S. (2020). Geocognitive Maps and Technologies: A New Stage in Cartography. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2 (25), 140–150. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-2-140-150 [in Russian].

5. Radchenko, L. K., Nikolaeva, O. N. (2024). Geospatial Modeling of a Region as a Means of Understanding the Environment for a Wide Range of Users. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29 (2), 100–107. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-100-107 [in Russian].

6. Radchenko, L. K., Nikolaeva, O. N. (2021). The Cognitive Aspect in Cartography: Features of Rational and Sensory Cognition in the Creation and Use of Maps. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26 (3), 108–115. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-108-115 [in Russian].

7. Lurie, I. K. (2002). *Fundamentals of Geoinformatics and GIS Creation [Osnovy geoinformatiki i sozdanie GIS]*. Moscow: INEKS-92 Publ., 140 p. [in Russian].

8. Lurie, I. K. (2008). *Geoinformation Mapping. Methods of Geoinformatics and Digital Processing of Satellite Images [Geoinformatsionnoe kartografirovanie. Metody geoinformatiki i tsifrovoy obrabotki kosmicheskikh snimkov]*. Moscow: Moscow State University Press, 424 p. [in Russian].

9. Berlyant, A. M. (2010). *Geoinformatics [Geoinformatika]*. Moscow: MSU Publ., 86 p. [in Russian].

10. Batty, M. (2005). *Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: The MIT Press, 565 p.

11. Basargin, A. A. (2024). Development of a Concept for Modeling and Simulation of Digital Twins of Urban Areas for Solving Practical Problems. *Vestnik SGUGiT* [*Vestnik SSUGT*], 29(4), 83–90. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-83-90 [in Russian].

12. De Smith, M. J., Goodchild, M. F., Longley, P. A. (2018). *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*. London: The Winchelsea Press, 617 p.

13. Kitchin, R., Dawkins, O. (2025). Digital Twins and Deep Maps. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 50(1), 1–7. DOI 10.1111/tran.12699.

14. Verkhova, G. V., Akimov, S. V., Prisyazhnyuk, A. S. (2021). Method of Multidimensional Geoinformation Modeling of a Geographical Region. *Information and Space [Informatsiya i Kosmos]*, 4, 32–39 [in Russian].

15. Beani, E., Colucci, E., La Riccia, L., Lingua, A. M., et al. (2023). The 3D Metric Survey for the Digital Cartographic Production to Support the Knowledge of the New Municipality of Mappano. *In Post Un-Lock.* The Urban Book Series. Springer, Cham, 153–168. DOI 10.1007/978-3-031-33894-6_12.

16. Bauer, M. (2024). Towards Cognitive Digital Twins: A Review of Semantic Data Models for Built Environment. *Buildings*, 14(7), P. 2216.

17. Ellul, C., Stoter, J. E., Bucher, B., et al. (2024). Towards National Connected Digital Twins: A Geospatial Perspective. *ISPRS Annals*, X-4/W5-2024, 147–154. DOI 10.5194/isprs-annals-X-4-W5-2024-147-2024.

18. Jones, D., Snider, S., Nassehi, A., et al. (2020). Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. DOI 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

19. Sukmanova, T. V., Belov, N. S. (2025). Digital Twin as a Tool for Modeling and Optimization of Complex Natural and Technical Systems. *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series:*

Natural Sciences [Vestnik Baltiyskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye nauki], 1, 40–57. DOI: 10.5922/vestniknat-2025-1-3 [in Russian].

20. Volkova, T. A., Kuzyakina, M. V., Karagyan, A. V., Ryaskin, A. A. (2025). Problems and Prospects of Creating Digital Twins of Cultural Heritage Objects in the Krasnodar Territory. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 4(40), 164–174. DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.013 [in Russian].

Об авторах

Анастасия Олеговна Лебзак – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики.

Евгений Викторович Лебзак – кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики.

Светлана Сергеевна Янкелевич – доктор технических наук, профессор, ректор.

Author details

Anastasiya O. Lebzak – PhD, Senior Lecturer, Department of Cartography and Geoinformatics.

Evgenii V. Lebzak – PhD, Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics.

Svetlana S. Yankelevich – DSc, Professor, Rector.

Получено / Received 21.04.2026
Поступила после рецензирования / Revised 17.08.2026
Принята к публикации / Accepted 07.09.2026

Научно-практическая статья/Research article
УДК 528.9:004.414.23 (597)
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-92-100

О выборе территориальных единиц картографирования для моделирования экологической обстановки города (на примере Ханоя)

Д. К. Нгуен[1]✉

[1]Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: nguyendinhquan7788266@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема выбора территориальных единиц картографирования при моделировании экологической обстановки крупного города. На примере Ханоя показано, что использование единственного типа пространственных единиц не позволяет одновременно учитывать природные закономерности миграции загрязняющих веществ, особенности пространственно непрерывных экологических факторов и требования государственного управления. Предлагается многоуровневая система операционных территориальных единиц (ОТЕ), включающая регулярную сетку, речные бассейны и единицы административно-территориального деления. Особое внимание уделяется обоснованию выбора сеточной ОТЕ первого уровня для картографирования пространственно непрерывных факторов городской среды. Выбор формы и размера сетки предлагается выполнять на основе шести критериев: свойств картографируемого явления, качества исходных данных, особенностей моделей и алгоритмов, масштаба картографирования, городской морфологии и чувствительности результатов к проблеме модифицируемой площадной единицы. В качестве базовой сеточной ОТЕ городского уровня предлагается регулярная шестиугольная сетка площадью около 25 га.

Ключевые слова: экологическое картографирование, ОТЕ, Ханой, шестиугольная сетка, речной бассейн, административные границы, MAUP

Для цитирования:
Нгуен Д. К. О выборе территориальных единиц картографирования для моделирования экологической обстановки города (на примере Ханоя). *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 92–100. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-92-100

On the selection of mapping units for modelling urban environmental conditions (case study of Hanoi)

D. Q. Nguyen[1]✉

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: nguyendinhquan7788266@gmail.com

Abstract. The article addresses the problem of selecting appropriate mapping units for modelling environmental conditions in large cities. Using Hanoi as a case study, the author demonstrates that reliance on a single type of spatial unit fails to simultaneously capture natural patterns of pollutant migration, the characteristics of spatially continuous environmental factors, and the requirements of administrative governance. To address this limitation, a hybrid system of operational territorial units

© Д. К. Нгуен, 2026

(OTU) that integrates a regular grid, river basins, and administrative-territorial divisions is proposed. Particular attention is given to substantiating the selection of first-level grid-based OTU for mapping spatially continuous factors of the urban environment. It is recommended that the selection of grid geometry and cell size be guided by six criteria: properties of the mapped phenomenon, quality of source data, characteristics of models and algorithms, mapping scale, urban morphology, and sensitivity of results to the modifiable areal unit problem (MAUP). As the baseline grid-based OTU at the city level, a regular hexagonal grid with a cell area of approximately 25 ha is proposed.

Keywords: environmental mapping, operational territorial unit (OTU), Hanoi, hexagonal grid, river basin, administrative boundaries, modifiable areal unit problem (MAUP)

For citation:
Nguyen D. Q. (2026). On the selection of mapping units for modelling urban environmental conditions (case study of Hanoi). *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 92–100. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-92-100

Введение

В современных географических и геоэкологических исследованиях обоснование операционной территориальной единицы картографирования относится к числу ключевых методических задач. Способ пространственной дискретизации территории определяет не только визуальные свойства создаваемой карты, но и достоверность результатов пространственного анализа, корректность интерполяции, сопоставимость разнородных пространственных данных, а также практическую ценность моделей для экологического менеджмента.

В условиях крупного города эта задача заметно усложняется. Источники загрязнения здесь многочисленны и распределены неравномерно, застройка плотная и разнородная, транспортные потоки интенсивны, а естественный растительный покров сохранился лишь отдельными фрагментами. Привязывать оценку исключительно к административным районам в такой ситуации нецелесообразно: атмосферные примеси, шумовое и тепловое загрязнение, поверхностный сток распространяются независимо от границ кварталов и общин. Вместе с тем полностью отказаться от административных единиц невозможно: именно на них опираются государственный статистический учет, природоохранный мониторинг и принятие управленческих решений.

Задача выбора операционных территориальных единиц при экологическом картографировании крупных городов решалась ранее по-разному. В российской практике утвердилось сочетание регулярных квадратных сеток с административным делением и ландшафтными контурами [1–3]; в Европе в управлении качеством городской среды преобладают квадратные сетки фиксированного шага – например, сетка 200×200 м, принятая при выделении зон управления качеством атмосферного воздуха для Антверпена и Гданьска [4]. Параллельно развиваются глобальные дискретные сетки на шестиугольных ячейках, обеспечивающие равноудаленность центроидов смежных элементов [5], а для оценки состояния водной среды устойчиво применяется бассейновое районирование [6, 7]. Общим для этих работ является то, что операционная единица выбирается однократно и фиксируется для всего исследования, тогда как вопрос о согласовании нескольких типов единиц в рамках единой городской геоинформационной системы, как правило, не ставится. Применительно к быстрорастущим городам Юго-Восточной Азии, в частности к Ханою, такое обоснование до настоящего времени не выполнялось.

Таким образом, методическая проблема состоит в рассогласовании пространственных основ: экологические процессы в городе развиваются в границах, задаваемых физико-географическими закономерностями и морфологией застройки, тогда как статистическая информация и управленческие решения привязаны к административно-территориальному делению.

Цель исследования – обосновать систему операционных территориальных единиц для моделирования экологической обстановки крупного города и определить параметры базовой сеточной единицы городского уровня на примере Ханоя. Задачи исследования: 1) проанализировать опыт выбора операционных территориальных единиц при экологическом картографировании крупных городов; 2) сопоставить сеточный, ландшафтный и бассейновый подходы к дискретизации городского пространства и оценить их применимость к условиям Ханоя; 3) сформулировать критерии выбора формы и размера сеточной единицы первого уровня; 4) обосновать ее геометрические параметры; 5) разработать многоуровневую систему операционных территориальных единиц, объединяющую сеточные, бассейновые и административные единицы, и показать ее применение на территории Ханоя.

Методы и материалы

Исследование опиралось на пространственные данные по территории Ханоя за 2023–2025 гг. В их состав вошли векторные слои административного деления, гидрографической и дорожной сети, а также зоны экологического регулирования в масштабе 1 : 25 000. Городская морфология уточнялась по материалам дистанционного зондирования со спутников Sentinel-2. Отдельный блок составили точечные данные многолетнего мониторинга атмосферного воздуха. Использовались методы пространственного анализа, растровой алгебры и гидрологического моделирования в среде геоинформационных систем (ГИС). Обоснование операционных территориальных единиц выполнялось на основе сопоставления геометрических и содержательных географических свойств территории.

Результаты и обсуждение

В теории геоэкологического картографирования ОТЕ понимается как базовая пространственная ячейка, предназначенная для сбора, анализа, интерполяции, агрегирования и визуализации геоэкологических данных. Необоснованный выбор ОТЕ влечет за собой генерализацию и искажение пространственной структуры загрязнения, смещение результирующих экологических оценок, а также принятие ошибочных управленческих решений [1].

Одной из фундаментальных проблем пространственного анализа, обусловленных выбором операционных единиц, является эффект модифицируемой площадной единицы (Modifiable Areal Unit Problem – MAUP). Он состоит в статистической и геометрической зависимости результатов анализа от формы, размера и способа группировки дискретных пространственных элементов. Так, один и тот же массив точечных данных мониторинга атмосферного воздуха при пространственном агрегировании по административным районам, регулярной сетке или гидрографическим бассейнам приводит к существенно различающимся оценкам характера и структуры загрязнения [2–4, 3, 8].

В тематическом картографировании единицы пространственного анализа принято разделять на два таксономических уровня. К первому относятся минимальные оценочные единицы, применяемые для расчета, интерполяции или моделирования геоэкологических показателей. Второй уровень формируют агрегированные аналитические единицы, предназначенные для генерализации результатов, их содержательной интерпретации и последующего внедрения в практику экологического менеджмента [9]. В геоинформационной практике выделяют три базовых подхода к дискретизации пространства и формированию таких операционных элементов.

Сеточный подход, наиболее широко применяемый в современных геоинформационных технологиях, базируется на регулярных матрицах дискретизации (чаще всего квадратных ячейках), равномерно покрывающих исследуемую территорию. Практика применения регулярных геометрических ячеек в качестве ОТЕ для оценки динамики природно-техногенных процессов активно развивается в отечественных исследованиях [10]. Главное преимущество метода – существенное упрощение алгоритмов пространственного моделирования и растровой ал-

гебры, что позволяет оперативно интегрировать гетерогенные пространственные данные. Однако с позиций ландшафтно-экологического анализа регулярные геометрические ячейки лишены содержательного географического смысла. Они искусственно фрагментируют биотопы, не отражают природных границ, а также нивелируют целостность экосистем и направленность вещественно-энергетических потоков [11].

Ландшафтный подход базируется на выделении естественных таксономических единиц физической географии (ландшафтов, урочищ, фаций). Метод высокоэффективен при оценке устойчивости природной среды к антропогенным воздействиям, поскольку каждый природно-территориальный комплекс (ПТК) характеризуется определенной экологической емкостью [1]. Тем не менее в условиях плотной урбанизированной среды (на примере Ханоя) подстилающая поверхность претерпела коренную трансформацию в результате сплошной застройки и асфальтирования земель. Это размывает границы исходных ПТК и затрудняет их классическое картографирование на общегородском уровне. При этом физико-географические факторы (мезорельеф, направление стока, особенности подстилающей поверхности) сохраняют свое определяющее влияние на перенос загрязняющих веществ. Это требует перехода от выделения комплексных ландшафтных контуров к покомпонентному учету природных закономерностей.

Бассейновый подход служит наиболее репрезентативной методологической основой геоэкологических исследований, что особенно актуально для регионов с развитой гидрографической сетью. Речной бассейн рассматривается не как сугубо орографически ограниченная территория, а как целостная природная геосистема, функционирование которой обусловлено однонаправленным стоком вещества и энергии от водораздельных линий к эрозионным понижениям [6]. Любая антропогенная нагрузка на водосборную площадь – от складирования твердых коммунальных отходов и внесения агрохимикатов до сброса неочищенных городских сточных вод – кумулируется гидросетью и наиболее отчетливо проявляется в качественных и количественных показателях водной среды в замыкающем створе.

Геоэкологические процессы, выступающие объектом экологического картографирования, обладают различной пространственной спецификой. Распространение загрязняющих веществ в атмосфере детерминировано конфигурацией источников эмиссии, метеорологическими условиями и морфологией городской застройки. Трансформация водной среды обусловлена границами водосборных бассейнов, особенностями рельефа и направлением поверхностного стока. Акустическое и тепловое загрязнения формируют поля, геометрия которых не совпадает с границами административного деления. Вследствие этого возникает методическое противоречие: статистическая информация и данные органов управления привязаны к административным границам, тогда как природные процессы развиваются согласно физико-географическим закономерностям [8, 9]. Для разрешения данного противоречия предложена многоуровневая система операционных территориальных единиц, интегрирующая три взаимосвязанных пространственных уровня.

Первый уровень пространственного анализа базируется на регулярной пространственной сетке. Она предназначена для картографирования непрерывных биофизических параметров городской среды: качества атмосферного воздуха, шумового воздействия, характеристик теплового поля и других показателей, изменяющихся независимо от административно-территориального деления. Городская территория разбивается на геометрические ячейки – минимальные оценочные единицы. Параметры такой сетки нельзя задавать произвольно. Геометрию ячейки определяет прежде всего физико-географическая природа картографируемого явления, а не удобство вычислений. Исходя из этого, сформулированы шесть критериев, которые задают форму и линейные размеры базовой ячейки городского уровня.

Критерий 1: физико-химические и пространственные свойства картографируемого явления. Выбросы автотранспорта и уровень шума дают резкие локальные перепады – зна-

чения заметно различаются уже на соседних улицах. Взвешенные частицы PM2.5 и PM10, напротив, формируют более сглаженное, хотя и неоднородное поле. Поэтому единый шаг сетки не может подходить сразу для всех типов загрязнения и уровней обобщения.

Критерий 2: пространственное разрешение и качество исходных данных. Размер ячейки должен согласовываться с разрешением спутниковых снимков, а также с плотностью и дискретностью метеорологических, картографических и наземных наблюдений. Если сделать шаг сетки слишком мелким, возникает эффект ложной точности: карта выглядит детальнее, чем это позволяет исходная информация.

Критерий 3: особенности применяемых моделей и алгоритмов. Сетка как ОТЕ должна быть совместима с процедурами обработки: пространственной интерполяцией, масштабированием данных, расчетом прогнозных параметров, растровой алгеброй, сопоставлением результатов моделирования. От нее требуется двойственное качество: достаточная генерализация, чтобы проявилась внутригородская неоднородность, и одновременно устойчивость, при которой показатели остаются статистически достоверными.

Критерий 4: целевой масштаб картографирования. Размер операционной единицы должен быть жестко привязан к масштабному уровню задачи. Для локального моделирования – отдельной улицы, транспортного узла – нужны высокое разрешение и минимальная ячейка. На региональном и общегородском уровнях шаг дискретизации, наоборот, укрупняют ради нужной степени генерализации.

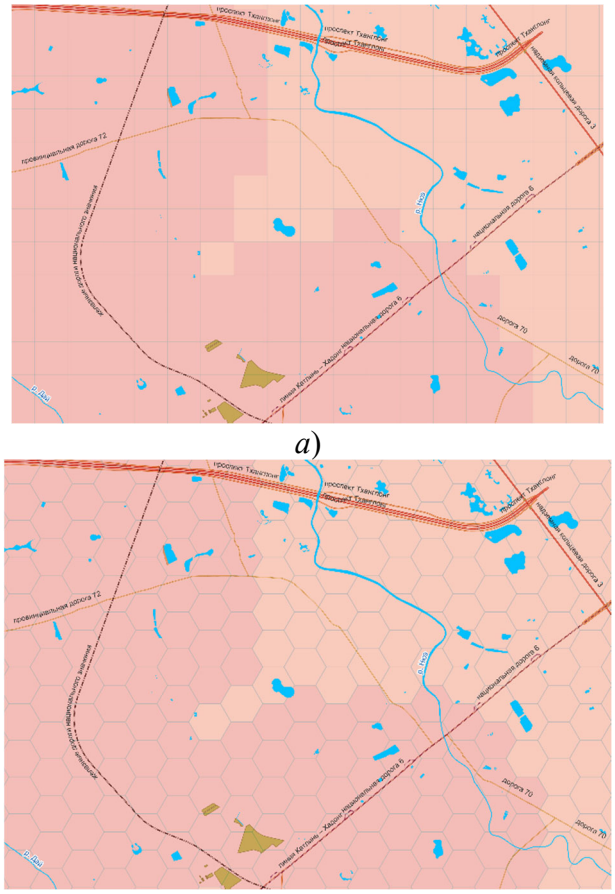
Критерий 5: морфология урбанизированных территорий и пространственная структура источников загрязнения. Ханой в этом отношении крайне неоднороден. Плотная жилая застройка соседствует здесь с крупными транспортными магистралями и промышленными зонами, рядом сохраняются традиционные ремесленные поселки, а между ними вклиниваются водоемы и массивы зеленых насаждений. Регулярная сетка должна улавливать эти контрасты, а не размывать их. Пространственная структура города – функциональное зонирование и плотность застройки – во многом определяет картину экологической обстановки на общегородском уровне [12].

Критерий 6: чувствительность результатов моделирования к эффекту модифицируемой площадной единицы (MAUP). Любая дискретизация непрерывного пространства вносит искажения, и форма и размер ячейки должны сводить их к минимуму, причем важна не только площадь ячейки, но и ее геометрия, характер смежности с соседними ячейками и устойчивость показателей при дальнейшей генерализации.

Система изложенных критериев свидетельствует об отсутствии универсального шага сетки, применимого для моделирования всех видов атмосферного загрязнения. Тем не менее для функционирования городской экологической ГИС требуется стандартизированная ОТЕ в виде регулярной сетки, обеспечивающая сопоставление разнородных экологических показателей в рамках единой геопространственной основы. В качестве сетки первого уровня предложена регулярная гексагональная сетка с площадью ячейки около 25 га [13]. Выбор таких геометрических параметров является методическим компромиссом. С одной стороны, эта площадь достаточна для отображения внутригородской контрастности экологической обстановки, например, для дифференциации зон интенсивной транспортной нагрузки, промышленной и плотной жилой застройки. С другой стороны, такой уровень генерализации нивелирует влияние локальных пропусков в данных мониторинга и исключает избыточную детальность, не подтвержденную точностью исходных материалов.

Выбор гексагональной сетки обусловлен ее ключевыми преимуществами перед традиционной квадратной сеткой (рис. 1). Гексагональная ячейка характеризуется изотропной топологической смежностью: каждый элемент имеет шесть смежных ячеек, центроиды которых находятся на равном расстоянии от центра данного элемента. У квадратных матриц есть известная слабость: смежность по стороне (ортогональная) и по вершине (диагональная) неравнозначны, и эта неоднозначность искажает пространственно-статистиче-

ский анализ связности, кластеризации, направлений распространения процессов. Шестиугольная сетка от этого недостатка свободна. Она снимает эффект пространственной анизотропии и точнее передает конфигурацию пространственных структур, не порождая артефактов, связанных с жесткой ориентацией квадратов по вертикали и горизонтали.



а)

б)

Рис. 1. Влияние типа сетки на конфигурацию границ зон концентрации PM2.5 (детальные фрагменты карт): *а*) прямоугольная сетка 500 × 500 м; *б*) эквивалентная ей шестиугольная сетка площадью 25 га

Второй уровень образуют природно-географические единицы, в первую очередь речные бассейны и их подбассейны. Данный уровень необходим для оценки экологического состояния водной среды, определения ассимиляционного потенциала водных объектов, моделирования процессов аккумуляции загрязняющих веществ и анализа суммарной антропогенной нагрузки на водосборные площади. При изучении гидросферы использование административных границ или регулярных сеток менее репрезентативно, поскольку пространственный перенос загрязняющих веществ обусловлен геоморфологическими особенностями рельефа и направлением поверхностного стока [6, 7]. Применительно к Ханою в качестве ОТЕ второго уровня приняты водосборные бассейны рек города, организованные иерархически: бассейн крупной реки включает бассейны ее притоков. Речная сеть относится к двум системам: р. Хонг, с подсистемами рек Нюэ и Дай, и р. Тхайбинь, представленной р. Кау; территории непосредственного стока в главные русла отнесены к частным водосборам. На рис. 2 иерархия показана на примере основных водотоков. Эти операционные единицы позволяют учитывать локализацию источников сброса и анализировать качественный состав донных отложений.

Бассейновый подход не заменяет сеточный, а дополняет его границы бассейнов применяют там, где развитие экологических процессов напрямую зависит от направления водного стока.

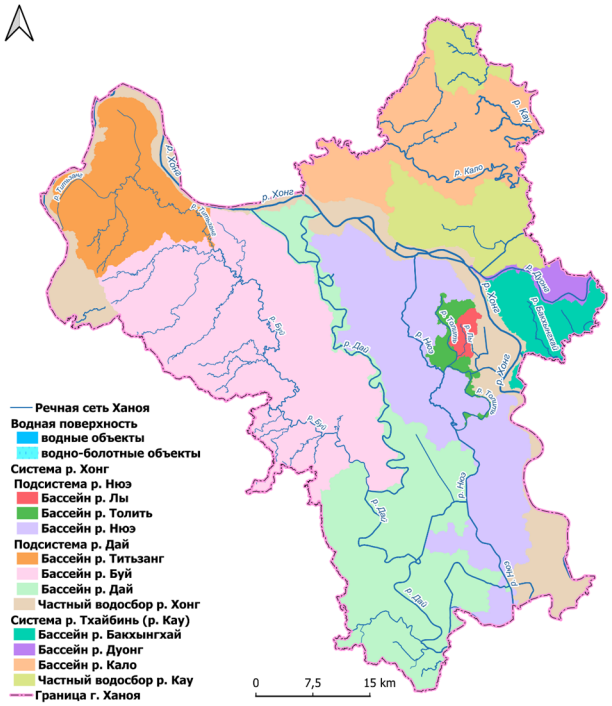


Рис. 2. Пространственная дифференциация водосборных бассейнов городской территории Ханоя

Третий уровень ОТЕ представлен единицами административно-территориального деления. Несмотря на высокую аналитическую эффективность регулярных сеток и гидрографических бассейнов при геоэкологическом моделировании, управленческие решения традиционно принимаются в границах официального территориального деления [14]. В связи с этим границы общин и городских кварталов целесообразно использовать в качестве итоговых единиц пространственного обобщения. Подобный подход позволяет интегрировать результаты научных оценок в действующую систему государственного учета [15], экологического нормирования и административного планирования. Наряду с границами районов важную роль играют установленные зоны экологического регулирования со специальным правовым режимом (ЗОУИТ в российской терминологии, а зоны строгой охраны и зоны ограничения эмиссии – во вьетнамской) (рис. 3).

Рис. 3. Карта современного состояния экологического зонирования территории Ханоя (2025 г.). Толщина линии речной сети отражает порядок реки

Согласно законодательству Вьетнама, экологическое зонирование территории предусматривает выделение зон строгой охраны, зон ограничения эмиссии и иных регулируемых пространственных элементов (Национальное собрание СРВ. Закон об охране окружающей среды от 17.11.2020 № 72/2020/QH14. – Ханой. – Текст : электронный; Правительство СРВ. Постановление от 10.01.2022 № 08/2022/NĐ-CP «О детальном регулировании отдельных положений Закона об охране окружающей среды». – Ханой. – Текст : электронный). К зонам строгой охраны относятся наиболее уязвимые территории, включая центральные городские районы, водосборы источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, природные заповедники, а также охранные зоны объектов историко-культурного наследия и центральные (ядерные) зоны объектов всемирного природного наследия. Зоны ограничения эмиссии объединяют буферные территории, ключевые водно-болотные угодья, водоохранные коридоры и иные экосистемы с высокой антропогенной чувствительностью. Цифровое представление данных границ в среде экологической ГИС позволяет автоматизировать сопоставление фактических или смоделированных показателей загрязнения с нормативными требованиями, а также оперативно генерировать уведомления для органов государственного управления.

Заключение

Обоснование операционной территориальной единицы картографирования служит определяющим методическим фактором достоверного моделирования геоэкологической обстановки урбанизированных территорий. На примере Ханоя показано, что изолированное использование какого-либо одного типа пространственных элементов не позволяет решить весь комплекс исследовательских задач.

Предложенная многоуровневая система ОТЕ позволяет совместить научную обоснованность геоэкологического анализа с требованиями государственного менеджмента. Первый уровень, представленный регулярной гексагональной сеткой с площадью ячейки около 25 га, служит единой геопространственной основой общегородского масштаба, минимизирующей искажения пространственного анализа от эффекта MAUP. Второй уровень – речные бассейны и подбассейны – отражает физико-географические закономерности функционирования гидросферы. Третий уровень, включаю-

щий административные границы и зоны с особыми условиями использования территорий, обеспечивает прямую интеграцию расчетных данных в действующие правовые и управленческие механизмы городского планирования, трансформируя теоретические модели в прикладной инструмент экологического контроля.

Научная новизна работы заключается в обосновании многоуровневой системы операционных территориальных единиц, в которой сеточные, бассейновые и административные единицы используются не как взаимоисключающие альтернативы, а как согласованные уровни единой геопространственной основы, и в определении параметров базовой гексагональной ячейки (около 25 га) для условий крупного быстрорастущего города Юго-Восточной Азии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стурман В. И. Экологическое картографирование: учебное пособие. М. : Аспект Пресс, 2003. 251 с.

2. Макаров В. З., Новаковский Б. А., Чумаченко А. Н. Эколого-географическое картографирование городов. М. : Научный мир, 2002. 196 с.

3. Павлова А. Н., Чумаченко Н. А., Ермолаева Е. И. Геоинформационное картографирование медико-экологической ситуации в крупном промышленном городе (на примере г. Балаково). Известия Саратовского университета. Новая Серия. Сер. Науки О Земле. 2007. Т. 7, № 1. С. 21–26.

4. Badach J., Voordeckers D., Nyka L., Van Acker M. A framework for Air Quality Management Zones – useful GIS-based tool for urban planning: Case studies in Antwerp and Gdańsk. Build-ing and Environment. 2020. Т. 174. С. 106743.

5. Sahr K., White D., Kimerling A. J. Geodesic Discrete Global Grid Systems. Cartography and Geographic Information Science. 2003. Т. 30, № 2. С. 121–134.

6. Yermolaev O. P., Usmanov B. M., Muharamova S. S. The Basin Approach and Mapping to the Anthropogenic Impact Assessment on the East of the Russian Plain. Int. J. Appl. Eng. Res. 2015. Т. 10, № 20. С. 41178–41184.

7. Mukharamova S., Ivanov M., Yermolaev O. Assessment of Anthropogenic Pressure on the Volga Federal District Territory Using River Basin Approach. Geosciences. 2020. Т. 10, № 4. С. 139.

8. Openshaw S. The modifiable areal unit problem. Norwich: Geo, 1984. 40 с.

9. Shen J., Chen C., Wang Y. What are the appropriate mapping units for ecosystem service assessments? A systematic review. Ecosyst. Health Sustain. 2021. Т. 7, № 1. С. 1888655.

10. Бешенцев А. Н., Петров С. А., Борисова Т. А., Лубсанов А. А. Картографическая оценка долговременной динамики природопользования дельтовой территории по разновремен-ным топографическим картам. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 62–72.

11. Cleland D. T., Avers P. E., McNab W. H., Jensen M. E., Bailey R. G., King T., Russell W. E. National Hierarchical Framework of Ecological Units. Ecosystem Management: Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources. New Haven, CT: Yale University Press, 1997. С. 181–200.

12. Трубина Л. К., Лисакова О. А., Хлебникова Т. А. Зеленая инфраструктура как инструмент устойчивого развития урбанизированных территорий. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 5. С. 140–150.

13. Birch C. P. D., Oom S. P., Beecham J. A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. Ecol. Model. 2007. Т. 206, № 3–4. С. 347–359.

14. Stenis J., Romanov M., Hogland W. Analysis and Classification of Modern Methods of Ecological Normalization of Anthropogenic Load: Russia vs. the West. Open Environ. Eng. J. 2011. Т. 4. С. 181–189.

15. Бирюков Д. А., Костеша В. А., Юнусов А. Г. Обоснование необходимости учета земель боевых сражений в Едином государственном реестре недвижимости. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 3. С. 116–127.

REFERENCES

1. Sturman, V. I. (2003). *Ekologicheskoe kartografirovanie [Ecological Mapping].* Moscow: Aspekt Press Publ., 251 p. [in Russian].

2. Makarov, V. Z., Novakovskiy, B. A., & Chumachenko, A. N. (2002). *Ekologo-geograficheskoe kartografirovanie gorodov [Ecological-Geographical Mapping of Cities].* Moscow: Nauchnyy Mir Publ., 196 p. [in Russian].

3. Pavlova, A. N., Chumachenko, N. A., & Ermolaeva, E. I. (2007). Geoinformation mapping of the medico-ecological situation in a large industrial city (a case study of Balakovo). *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya Seriya. Seriya Nauki o Zemle [Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences],* 7(1), 21–25 [in Russian].

4. Badach, J., Voordeckers, D., Nyka, L., & Van Acker, M. (2020). A framework for Air Quality Management Zones – useful GIS-based tool for urban planning: *Case studies in Antwerp and Gdańsk. Building and Environment,* 174, 106743. DOI 10.1016/j.buildenv.2020.106743.

5. Sahr, K., White, D., & Kimerling, A. J. (2003). Geodesic discrete global grid systems. *Cartography and Geographic Information Science,* 30(2), 121–134. DOI 10.1559/152304003100011090.

6. Yermolaev, O. P., Usmanov, B. M., & Mukharamova, S. S. (2015). The basin approach and mapping to the anthropogenic impact assessment on the East of the Russian Plain. *International Journal of Applied Engineering Research,* 10(20), 41178–41184.

7. Mukharamova, S., Ivanov, M., & Yermolaev, O. (2020). Assessment of anthropogenic pressure on the Volga Federal District territory using river basin approach. *Geosciences,* 10(4), 139. DOI 10.3390/geosciences10040139.

8. Openshaw, S. (1984). The Modifiable Areal Unit Problem. Norwich: Geo Books, 40 p. (Concepts and Techniques in Modern Geography, No. 38).

9. Shen, J., Chen, C., & Wang, Y. (2021). What are the appropriate mapping units for ecosystem service assessments? A systematic review. *Ecosystem Health and Sustainability,* 7(1), 1888655. DOI 10.1080/20964129.2021.1888655.

10. Beshentsev, A. N., Petrov, S. A., Borisova, T. A., & Lubsanov, A. A. (2024). Cartographic assessment of long-term dynamics of nature management of a delta territory from multi-temporal topographic maps. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 29(2), 62–72. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-62-72 [in Russian].

11. Cleland, D. T., Avers, P. E., McNab, W. H., Jensen, M. E., Bailey, R. G., King, T., & Russell, W. E. (1997). National hierarchical framework of ecological units. In M. S. Boyce & A. W. Haney (Eds.), Ecosystem Management: Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources (pp. 181–200). New Haven, CT: Yale University Press.

12. Trubina, L. K., Lisakova, O. A., & Khlebnikova, T. A. (2023). Green infrastructure as a tool for sustainable development of urbanized areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 28(5), 140–150. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-140-150 [in Russian].

13. Birch, C. P. D., Oom, S. P., & Beecham, J. A. (2007). Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological Modelling*, 206(3–4), 347–359. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041.

14. Stenis, J., Romanov, M., & Hogland, W. (2011). Analysis and classification of modern methods of ecological normalization of anthropogenic load: Russia vs. the West. *The Open Environmental Engineering Journal*, 4, 181–189. DOI 10.2174/1874829501104010181.

15. Biryukov, D. A., Kostesha, V. A., & Yunusov, A. G. (2021). Justification of necessity for battlefields registration in the unified state real estate register. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 26(3), 116–127. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-116-127 [in Russian].

Об авторе

Нгуен Динь Куан – аспирант кафедры картографии.

Author details

Nguyen Dinh Quan – PhD Student, Department of Cartography.

Получено / Received 17.08.2026
Поступила после рецензирования / Revised 15.09.2026
Принята к публикации / Accepted 02.10.2026

Научно-практическая статья/Research article
УДК 528.9:528.85 (597)
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-101-111

Оценка изменения и трансформации водных и околоводных объектов города Хайфон на основе разновременных космических изображений Landsat

Данг Хиен Фам[1✉], *В. В. Братков*[1]

[1]Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: lopmaybay@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена изменению и трансформации гидрографической сети города Хайфон (Вьетнам) в период с 1986 по 2025 г. Источником данных послужили разновременные снимки Landsat 5 и Landsat 9, обработанные на платформе Google Earth Engine. Методика включает расчет 78 спектральных индексов, формирование обучающих выборок для классов «вода» и «не-вода», пороговую бинарную классификацию с подбором порога по максимуму F1-меры, объединение результатов 20 наиболее точных индексов и последующую векторизацию полученных растров. Сопоставление карт за 1986 и 2025 гг. показало, что площадь открытой воды сократилась на 87 км² (на 11,6 %), тогда как портовые и промышленные зоны расширились более чем на 40 км²; площадь защитных мангровых лесов выросла более чем на 40 км², а под аквакультуру было освоено свыше 32 км² прибрежных земель. Дополнительно зафиксированы намыв искусственных островов общей площадью около 17 км² и углубление судоходных каналов. Выявленные процессы отражают интенсивное антропогенное воздействие – урбанизацию, развитие портов и меры адаптации к изменению климата. Результаты могут быть использованы при планировании регионального развития.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Landsat, спектральные индексы, водные объекты, мангровые леса, аквакультура, Хайфон, морские порты

Для цитирования:
Данг Хиен Фам, Братков В. В. Оценка изменения и трансформации водных и околоводных объектов города Хайфон на основе разновременных космических изображений Landsat. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 101–111. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-101-111

Assessing changes and transformation of aquatic and near-shore features in Hai Phong City using multi-temporal Landsat satellite imagery

Dang Hien Pham[1✉], *V. V. Bratkov*[1]

[1]Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: lopmaybay@gmail.com

Abstract. The study quantifies changes and transformation of the hydrographic network of Hai Phong City (Vietnam) over the period 1986–2025. Multi-temporal Landsat 5 and Landsat 9 imagery were processed within the Google Earth Engine platform. The methodology comprised computation of 78 spectral indices, construction of training samples for “water” and “non-water” classes, threshold-based binary classification with thresholds optimized to maximize the F1-score, aggregation of results from the 20 most accurate indices, and subsequent vectorization of the resulting raster maps. Com-

© Д. Х. Фам, В. В. Братков, 2026

parison of the 1986 and 2025 water-body maps revealed a decrease in open-water area of 87 km² (11.6%), whereas seaport and industrial zones expanded by more than 40 km², protective mangrove forests increased by over 40 km², and more than 32 km² of coastal land was converted to aquaculture. In addition, land reclamation resulting in artificial islands with a total area of approximately 17 km² and deepening of navigation channels were documented. The changes reflect intensive anthropogenic pressures, including urbanization, seaport development, and climate-change adaptation measures. The findings can support evidence-based regional development planning.

Keywords: remote sensing, Landsat, spectral indices, water bodies, mangrove forests, aquaculture, Hai Phong, seaports

For citation:
Dang Hien Pham, Bratkov V. V. (2026). Assessing changes and transformation of aquatic and near-shore features in Hai Phong City using multi-temporal Landsat satellite imagery. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 101–111. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-101-111

Введение

Город Хайфон, расположенный в северной части Социалистической Республики Вьетнам на побережье Тонкинского залива, представляет собой один из ключевых промышленных, портовых и логистических центров страны. В настоящее время городская территория составляет 1519,2 км², на которой проживает около 2 млн чел. Хайфон характеризуется тропическим муссонным климатом, при этом большая часть из 1 800 мм годовой суммы осадков выпадает с мая по октябрь. Также здесь часто отмечаются тайфуны, что усиливает уязвимость водных и околоводных объектов к действию природных и антропогенных факторов. За последние 40 лет регион претерпел радикальные изменения: урбанизация привела к росту застройки на 300–500 % в период 1989–2013 гг.; расширение портов увеличило грузооборот до 190 млн т в 2024 г., а развитие аквакультуры преобразовало прибрежные земли в фермы по разведению морепродуктов, на которых в 2030 г. планируется получать до 1,4 млн т продукции. Эти процессы протекают на фоне повышения уровня моря со скоростью до 3,56 мм/год (1960–2020 гг.), с эрозией берегов и потерей естественных экосистем, таких как мангровые леса, которые играют роль естественного барьера против наводнений и эрозии [1]. Методические подходы к оценке современных климатических условий территории, основанные на совместном использовании наземных метеонаблюдений и спутниковых данных низкого пространственного разрешения, рассмотрены в [2].

Исследования изменения и трансформации гидрологической сети в прибрежных зонах Вьетнама активно используют методы дистанционного зондирования Земли. Спутниковые изображения Landsat, предоставляемые Геологической службой США (USGS) с 1972 г., позволяют проводить долгосрочный мониторинг изменений региональных природных и антропогенных ландшафтов, а также водных объектов благодаря их пространственному разрешению (30 м) и достаточно длительным временным рядам данных [3]. Спектральные индексы, такие как NDWI и MNDWI, успешно применялись для выделения внутренних вод в тропических регионах, однако комплексные подходы с множеством индексов и оптимизацией классификации по F_1-мере остаются недостаточно разработанными для урбанизированных прибрежных зон типа Хайфона [4]. Например, анализ береговой линии Вьетнама за 1986–2021 гг. выявил эрозию в дельте Красной реки, где расположен Хайфон, с потерей до 10–15 % прибрежных территорий [5]. Кроме того, мангровые леса в Хайфоне расширились с 300 га в 1990 г. до 3 000 га к настоящему времени, но это сопровождалось сокращением открытых водных поверхностей за счет отсыпки и посадок [6]. Прибрежные территории Вьетнама исследуются и российскими специалистами: выполнено картографирование приливно-отливных отмелей вдоль побережья страны по радиолокационным изображениям Sentinel-1

с применением методов глубокого обучения [7], а также классификация устьевых и прибрежных водно-болотных угодий по снимкам Planet NICFI на основе сверточных нейронных сетей и трансферного обучения [8].

Для выделения водных и околоводных объектов и соответствующих им поверхностей применялись такие спектральные индексы, как NDWI [9], MNDWI [10], AWEI [11] и WI2015 [12], демонстрирующие высокую точность в различных сценариях [13]. Сравнительно новые индексы, например SMBWI, опирающиеся на оптические снимки Sentinel-2, а также комбинация NDWI с интеграцией цифровых моделей рельефа улучшают извлечение искомых параметров в сложных условиях, достигая F_1-меры выше 0,9 [14]. Методы пороговой сегментации с оптимизацией порога по F_1-мере применяются для бинарной классификации и повышают точность на 10–15 % по сравнению с одиночными индексами [15]. В отечественных работах показано, что разновременные снимки Sentinel-1, Sentinel-2 и Landsat позволяют выявлять природно-антропогенную трансформацию береговой линии за несколько десятилетий [16], а интеграция разнородных данных дистанционного зондирования повышает достоверность мониторинга состояния акваторий [17]. Систематизация методов и средств искусственного интеллекта применительно к анализу и интерпретации данных дистанционного зондирования выполнена в [18].

Цель исследования – оценка изменения и трансформации водных и околоводных объектов г. Хайфон за 1986–2025 гг. на основе данных дистанционного зондирования Landsat.

Задачи включают: 1) расчет спектральных индексов (78); 2) отбор обучающих выборок и бинарную классификацию с оптимизацией F_1-меры; 3) комбинацию результатов и векторизацию; 4) сравнение карт и интерпретацию изменений.

Методы исследования

Алгоритм исследования представлен на рис. 1.

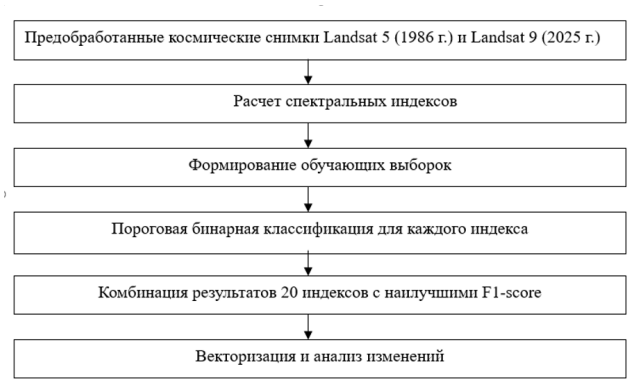


Рис. 1. Алгоритм исследования

Территория исследования охватывает прямоугольный участок размером 53,37×47,4 км (общая площадь около 2 530 км²), который включает не только территорию г. Хайфон, но и прилегающие районы соседних провинций (Куангнинь на северо-востоке, Хайзыонг на северо-западе, Тхайбинь на юго-западе) и часть Тонкинского залива. Спутниковые изображения Landsat не обрезаны по административным границам, а выбраны в форме прямоугольника для обеспечения полного покрытия водных и околоводных объектов, поскольку административные границы Хайфона часто проходят по середине речных русел (например, по рекам Красной и Тай Бинь), что делает необходимым более широкий обзор для анализа динамики рек, каналов и прибрежных вод. Это позволяет получить всестороннее представление о взаимосвязях в данной части гидросферы, включая влияние соседних регионов на эрозию, седиментацию и водный баланс.

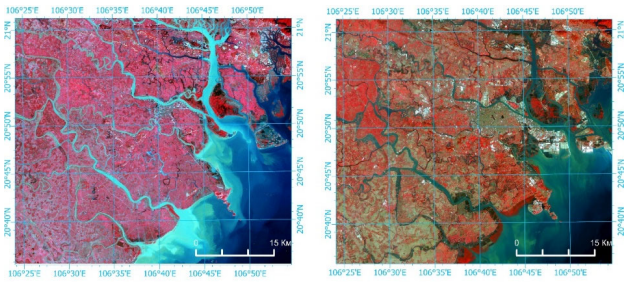
В качестве исходных данных использовались спутниковые изображения Landsat, полученные с платформы Google Earth Engine (GEE) [19]. Выбор этой платформы обусловлен ее возможностями по обработке больших массивов данных, предобработке изображений (атмосферная коррекция, геопривязка, маскирование облачности) и расчету спектральных индексов в облачной среде без загрузки данных на локальный компьютер. Для анализа были выбраны два изображения из коллекций Landsat.

Для 1986 г. (рис. 2, *а*): изображение из коллекции LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 с идентификатором LT05_126046_19861030. Это

изображение получено сенсором Thematic Mapper (TM) спутника Landsat 5, имеет пространственное разрешение 30 м для видимых и инфракрасных каналов. Дата съемки – 30 октября 1986 г., выбрана с учетом минимальной облачности (0 %) и сезонных условий (сухой сезон для минимизации влияния осадков на водные объекты).

Для 2025 г. (рис. 2, *б*): изображение из коллекции LANDSAT/LC09/C02/T1_L2 с идентификатором LC09_126046_20250102. Это данные сенсора Operational Land Imager (OLI) спутника Landsat 9, также с разрешением 30 м, дата съемки – 2 января 2025 г. Выбор этой даты обеспечивает сопоставимость с 1986 г. по сезонным факторам и низкой облачностью (0 %).

Оба изображения подвергнуты стандартной предобработке в GEE: атмосферная коррекция до уровня поверхностного отражения (Surface Reflectance, SR), маскировка облаков, а также обрезка по границам исследования. Различия в спектральных каналах между Landsat 5 (7 каналов: B1-B7) и Landsat 9 (11 каналов: B1-B11, включая дополнительные термические и панхроматический) учтены при расчете индексов: для Landsat 5 индексы, требующие отсутствующих каналов (например, B8 – панхроматический или B10/B11 – термические), пропускались.



LT05_126046_19861030 LC09_126046_20250102

а) *б*)

Рис. 2. Исходные снимки:

а) Landsat 5 (1986 г.); *б*) Landsat 9 (2025 г.) (комбинация NIR, RED, GREEN)

Расчет спектральных индексов. Список из 78 спектральных индексов составлен на основе базы данных Index Database (https://www.indexdatabase.de/), содержащей индексы для сенсора Landsat 8 OLI (аналогичного Landsat 9) [20]. Из полного списка (114 индексов) отобраны уникальные по формуле, адаптированные для Landsat, с исключением дубликатов и индексов, не применимых к водным объектам. Формулы индексов взяты из базы и реализованы на JavaScript для GEE с заменой обозначений каналов на стандартные (B1 = Coastal, B2 = Blue, B3 = Green, B4 = Red, B5 = NIR, B6 = SWIR1, B7 = SWIR2, B10/Thermal1, B11/Thermal2).

Для Landsat 5 рассчитано 70 индексов, поскольку некоторые требуют каналов, отсутствующих в TM, например, B1 (побережья и аэрозоли 0,433–0,453 мкм), B9 (перистые облака 1,360–1,390 мкм) или TIR2 (дальний ИК 11,50–12,50 мкм). Для Landsat 9 все 78 индексов рассчитаны. Расчет выполнен для каждого индекса, с последующим экспортом в многослойный растр.

Полный список индексов с их формулами представлен в скрипте https://code.earthengine.google.com/eb0ec2d63e84d8856f0aec7b3788acbe.

Выборка и классификация. Процесс отбора обучающих выборок был выполнен в программном обеспечении ArcGIS Pro, которое позволяет создавать и управлять геопространственными данными с высокой точностью. Сначала были загружены спутниковые изображения Landsat для 1986 и 2025 гг., полученные из Google Earth Engine (как описано выше). На основе визуальной интерпретации изображений и вспомогательных данных (таких как высококачественные снимки Google Earth, полевые наблюдения 2024 г.) были созданы полигоны для классов покрытия поверхности для каждого снимка.

Для класса «вода» (реки, каналы, морская акватории, участки с аквакультурой) на каждом снимке отобрано 67 000 точек, распределенных равномерно по территории Хайфона, с учетом разнообразия (открытые воды, мелководья, загрязненные зоны).

Для класса «не-вода», /околоводная поверхность / (растительность, урбанизированные территории, мангровые леса) аналогично отобрано более 16 000 и 22 000 точек для снимков 1986 и 2025 гг. соответственно, чтобы охватить все основные типы покрытия

(естественная земная поверхность, сельскохозяйственные угодья, строения).

Оценка точности карты является ключевым фактором для обоснования ее пригодности к практическому применению, например для мониторинга процесса урбанизации в бассейне Красной реки [21]. Для каждого растрового изображения спектрального индекса применена пороговая бинарная классификация; порог оптимизирован по максимуму F_1-меры с помощью итеративного алгоритма (перебор порогов от минимума до максимума с 500 шагами).

Критерий F_1 (F-мера) рассчитается с использованием следующего уравнения:

$$F_1 = \frac{2 \cdot (P \cdot R)}{P + R}, \quad (1)$$

где P – точность (Precision) – доля правильно предсказанных положительных случаев среди всех предсказанных положительных:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (2)$$

R – полнота (Recall) – доля правильно предсказанных положительных случаев среди всех истинных положительных:

$$P = \frac{TP}{FP + FN}, \quad (3)$$

где TP (True Positives) – истинно положительные (правильно предсказанные положительные случаи); FP (False Positives) – ложноположительные (отрицательные случаи, ошибочно предсказанные как положительные); FN (False Negatives) – ложноотрицательные (положительные случаи, ошибочно предсказанные как отрицательные).

Выбраны 20 индексов с наивысшей F_1-мерой (>0,95). Пиксель считается водой, если ≥3 индекса классифицируют его как воду.

Выбор именно 20 спектральных индексов с последующей индивидуальной классификацией и агрегацией результатов (голосование с порогом ≥3) позволяет повысить точность идентификации водных объектов. Это обусловлено тем, что отдельные пиксели воды могут быть неверно классифицированы в большинстве индексов из-за вариабельности условий (например, тени, загрязнения или смешение с растительностью), но правильно определены в нескольких специфических индексах, чувствительных к определенным характеристикам. Аналогично, пиксели «невода» (например, влажные почвы или темные крыши) могут быть ложноположительными в одних индексах, но отрицательными в других. Комбинация множественных индексов снижает влияние этих ошибок, обеспечивая более точную классификацию.

Кроме того, использование множества индексов компенсирует ограничения отбора обучающих выборок: несмотря на большую выборку, невозможно охватить все вариации водных поверхностей (разные составы, мутности, цвета – от чистых рек до солоноватых прибрежных вод или прудов с водорослями в качестве аквакультуры). Каждый индекс фокусируется на разных спектральных свойствах (видимый диапазон для цвета, NIR/SWIR для поглощения воды), что в совокупности повышает охват. Этот подход также позволяет выявить области для ручной корректировки: анализ показывает сложные участки, где классификация неоднозначна (низкое количество подтверждающих индексов). Например, на рис. 3 (изображение с агрегацией результатов классификации показывает количество индексов классифицировало пиксель как воду) только 3 индекса классифицировали пиксели прибрежных вод, не включенных в обучающую выборку (квадрат № 1) как воду, возможно, из-за высокой мутности, в то время как на дамбе острова (квадрат № 2) 17 индексов классифицировали пиксели «неводы» как воду. Такой подход позволяет вручную уточнить результаты классификации, пороги или добавить обучающие выборки для этих регионов, повышая точность.

После этого растровые изображения векторизованы для корректировки и создания карты изменений площадей водной поверхности (рис. 4).

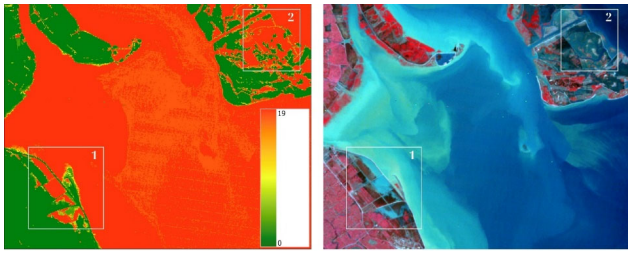


Рис. 3. Фрагмент растрового изображения с агрегацией результатов классификации и Landsat 5 (комбинация NIR, RED, GREEN)

Результаты

Анализ изменений водных и околоводных объектов г. Хайфона на основе изображений Landsat за период 1986–2025 гг. выявил их значительную трансформацию, обусловленную антропогенной деятельностью, урбанизацией и мерами по адаптации к изменению климата (см. рис. 4).

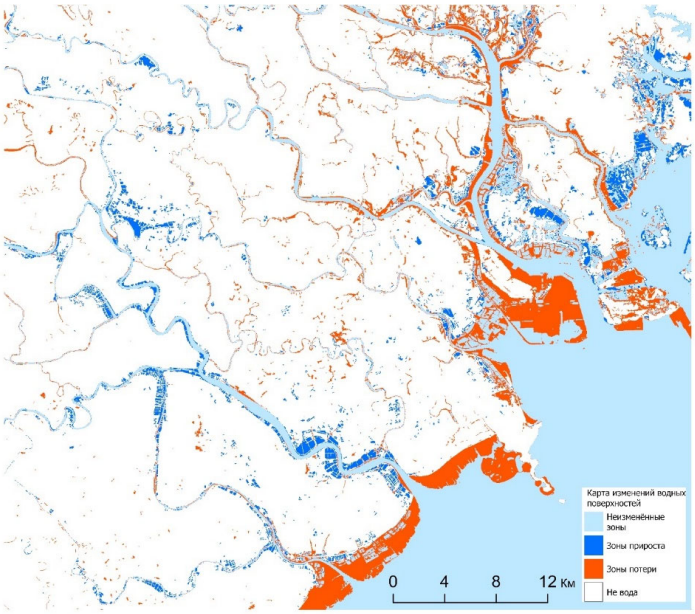


Рис. 4. Изменение и трансформация водных поверхностей г. Хайфона за период 1986–2025 гг.

Площадь мангровых лесов увеличилась более чем на 40 км², что согласуется с общей тенденцией восстановления мангровых экосистем региона, фиксируемой по данным дистанционного зондирования [22].

Для интерактивной визуализации результатов разработана веб-карта, доступная по адресу https://x102.github.io/waterchange-Haiphong1986-2025/ , где пользователи могут просматривать слои водных и околоводных объектов по состоянию на 1986 и 2025 гг., на основе которых были рассчитаны изменения и соответствующие площади, базовые карты и легенду, с возможностью масштабирования и переключения слоев для детального анализа (рис. 5).

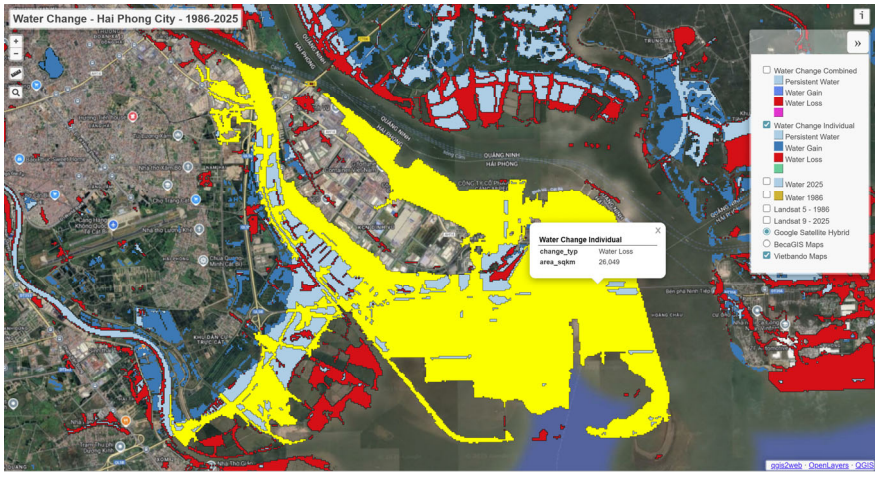


Рис. 5. Интерфейс веб-карты изменений водных поверхностей г. Хайфона

В таблице представлены 20 индексов, их формулы в виде кода Javascript для обработки космических снимков Landsat-9 на платформе Google Earth Engine, пороговые значения и соответствующие точности для каждого индекса.

20 лучших индексов (по F1-мере) для выделения поверхностных вод по космическим снимкам Landsat 9

Номер	Английское название	Формула для Javascript в GEE	Порог	F_1-мера	Accuracy	Kappa
1	Simple Ratio MIR/Red	B7 / B4	0,1737	0,9994	0,9991	0,9977
2	B6	B6	0,0316	0,9994	0,9991	0,9977
3	Gossan	B6 / B4	0,2981	0,9994	0,9991	0,9976
4	B7	B7	0,0166	0,9994	0,9991	0,9975
5	Green Soil Adjusted Vegetation Index (GSAVI)	(B5 - B3) * (1 + 0.5) / (B5 + B3 + 0.5)	–0,0836	0,9992	0,9988	0,9969
6	Difference NIR/Green (GDVI)	B5 - B3	–0,0392	0,9992	0,9988	0,9968
7	Green Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (GOSAVI)	(B5 - B3) / (B5 + B3 + 0.16)	–0,1134	0,9992	0,9988	0,9968
8	Global Vegetation Moisture Index (GVMI)	(B5 + 0.1 - B7 + 0.02) / (B5 + 0.1 +B7 + 0.02)	0,8655	0,9992	0,9988	0,9967
9	Infrared percentage vegetation index (IPVI)	B5/(2*(B5 + B4)) * (((B4 - B3) / (B4 + B3)) + 1)	0,1986	0,9991	0,9987	0,9965
10	Chlorophyll Index Green (CIgreen)	B5 / B3 - 1	–0,3539	0,9991	0,9987	0,9964
11	Simple Ratio 860/550	B5 / B3	0,6461	0,9991	0,9987	0,9964
12	Normalized Difference Water Index (NDWI)	(B5 - B3) / (B5 + B3)	–0,2145	0,9991	0,9986	0,9964
13	Norm NIR	B5 / (B5 + B4 + B3)	0,2663	0,9990	0,9986	0,9962
14	Green-Red NDVI (GRNDVI)	(B5 - (B3 + B4)) / (B5 + (B3 + B4))	–0,4673	0,9990	0,9986	0,9962
15	Log Ratio (LogR)	log(B5/B4)	–0,1839	0,9986	0,9980	0,9946
16	Transformed NDVI	sqrt((B5 - B4) / (B5 + B4) + 0.5)	0,6390	0,9986	0,9980	0,9946
17	Atmospherically Resistant Vegetation Index 2 (ARVI2)	-0.18 + 1.17 * ((B5 - B4) / (B5 + B4))	–0,2873	0,9986	0,9980	0,9946
18	Simple Ratio NIR/RED	B5 / B4	0,8318	0,9986	0,9980	0,9946
19	Modified Simple Ratio NIR/RED (MSRNir/Red)	(B5/B4 - 1) / ((B5/B4 + 1)**0.5)	–0,1234	0,9986	0,9980	0,9946
20	Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI)	(0.1 * B5 - B4) / (0.1 * B5 + B4)	–0,8462	0,9986	0,9980	0,9946

Обсуждение

Сочетание комбинированной классификации с последующей ручной корректировкой обеспечило высокую точность выделения водной поверхности – средняя F_1-мера превысила 0,97. Такой результат во многом объясняется спектральными свойствами самой

воды: сильным поглощением в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах при низком отражении в видимой области. Эти свойства делают границу «вода – суша» достаточно контрастной, поэтому бинарная классификация воды оказывается заметно надежнее, чем разделение растительности, почв и застройки. Для неводных классов точность ожидаемо ниже: в плотно застроенных кварталах из-за смешанных пикселей значение F_1-меры опускается ниже 0,80.

Зафиксированные изменения площади водных объектов неоднозначны по своим последствиям. С экономической точки зрения расширение портов и распространение аквакультуры способствуют росту валового продукта города, а мангровые насаждения, помимо защиты берегов от эрозии, создают предпосылки для развития экотуризма. Намытые искусственные острова (около 16 км²) и новые пляжи также увеличивают туристическую привлекательность территории. Вместе с тем сужение и засыпка речных русел ухудшают отвод ливневых вод в городских районах: после тайфунов это оборачивается подтоплениями и дополнительным экономическим ущербом. Таким образом, хозяйственное освоение прибрежной зоны Хайфона дает выигрыш в одних сферах за счет нарастающих рисков в других.

Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы и предложить соответствующие рекомендации.

1. Ключевыми аспектами разработанной методики, показавшими высокую эффективность выполнения соответствующих технологических операций по дешифрированию данных дистанционного зондирования, являются расчет по 78 спектральным индексам и их отбор по F_1-мере, объединение результатов 20 наиболее точных индексов и последующей векторизации полученных растров, использование интерактивной веб-карты для актуализации результатов мониторинга соответствующих параметров анализируемой территории.

2. На основании предложенной методики, основанной на дешифрировании разновременных космических изображений Landsat 5 и Landsat 9, обработанные на платформе Google Earth Engine, установлены следующие изменения: сокращение открытой поверхности воды на 87 км²; прирост портовых и промышленных зон более чем на 40 км²; расширение мангровых лесов более чем на 40 км² и увеличение площади под аквакультуру свыше 32 км².

3. Анализ полученных параметров показал, что за период с 1986–2025 гг. водные и околоводные объекты в пределах г. Хайфона претерпели существенные изменения, связанные с природными факторами (повышение уровня моря, абразия берегов), а также трансформацию, обусловленную активным антропогенным освоением территории (урбанизация, расширение портов и развитие аквакультуры).

4. Выявленные существенные изменения и полученные результаты необходимо учитывать при разработке и реализации региональной стратегии развития изучаемого региона, что позволит согласовать экономическое развитие с сохранением природных экосистемы города Хайфон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nguyen Minh Hai, Ouillon S., Duy Vinh Vu. Sea-level rise in Hai Phong coastal area (Vietnam) and its response to ENSO – evidence from tide gauge measurement of 1960–2020. Vietnam Journal of Earth Sciences. 2022. DOI 10.15625/2615-9783/16961.

2. Бекмурзаева Л. Р., Братков В. В., Керимов И. А. Оценка современных агроклиматических условий Северного Кавказа на основе наземных метеонаблюдений и данных низкого пространственного разрешения. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 6. С. 27–35. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-6-27-35.

3. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature. 2016. Vol. 540. P. 418–422. DOI 10.1038/nature20584.

4. Zhao C. [et al.]. Evaluating spectral indices for water extraction: Limitations and contextual usage recommendations. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. Vol. 139. Art. 104510. DOI 10.1016/j.jag.2025.104510.

5. Lappe R., Ullmann T., Bachofer F. State of the Vietnamese Coast – Assessing Three Decades (1986 to 2021) of Coastline Dynamics Using the Landsat Archive. Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 10. Art. 2476. DOI 10.3390/rs14102476.

6. Pham Tien Dat, Yoshino K. Comparing Mangrove Forest Management in Hai Phong City, Vietnam towards Sustainable Aquaculture. Procedia Environmental Sciences. 2013. Vol. 17. P. 109–118. DOI 10.1016/j.proenv.2013.02.018.

7. Куен Д. Т., Малинников В. А., Сереке Т. Э., Нго С. Х. Картографирование приливно-отливных отмелей вдоль побережья Вьетнама с использованием методов глубокого обучения на основе изображения Sentinel-1. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 6. С. 70–82. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-70-82.

8. Куен Д. Т., Малинников В. А. Классификация устьевых и прибрежных водно-болотных угодий по снимкам Planet NICFI на основе сверточных нейронных сетей и трансферного обучения. Геодезия и картография. 2024. № 6. С. 31–42. DOI 10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42.

9. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, № 7. P. 1425–1432. DOI 10.1080/01431169608948714.

10. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, № 14. P. 3025–3033. DOI 10.1080/01431160600589179.

11. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 23–35. DOI 10.1016/j.rse.2013.08.029.

12. Fisher A., Flood N., Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 175. P. 167–182. DOI 10.1016/j.rse.2015.12.055.

13. Rajeswari S., Rathika P. Exploring Spectral Indices for Improved Water Body Classification in Landsat Imagery. 2024 Third International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). Krishnankoil, India, 2024. DOI 10.1109/INCOS59338.2024.10527525.

14. Sun Q., Li J. A method for extracting small water bodies based on DEM and remote sensing images. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 760. DOI 10.1038/s41598-024-51346-7.

15. Esposito C., Landrum G. A., Schneider N., Stiefl N., Riniker S. GHOST: Adjusting the Decision Threshold to Handle Imbalanced Data in Machine Learning. Journal of Chemical Information and Modeling. 2021. Vol. 61, № 6. P. 2623–2640. DOI 10.1021/acs.jcim.1c00160.

16. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Анализ изменений природно-антропогенной трансформации береговой линии Азербайджанского сектора Каспийского моря. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 4. С. 85–93. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-85-93.

17. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А., Каленицкий А. И. Разработка методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли (на примере акватории азербайджанского сектора Каспийского моря). Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 6. С. 53–61. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-53-61.

18. Колесников А. А. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования. Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 3. С. 74–94. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94.

19. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI 10.1016/j.rse.2017.06.031.

20. Henrich V., Jung A., Götze C., Sandow C., Thürkow D., Gläßer C. Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop. Tel Aviv, Israel, 2009.

21. Фам Ч., Фам Д. Разработка методики автоматического мониторинга процесса урбанизации бассейна Красной реки (Вьетнам). Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 6 (144). DOI 10.60797/IRJ.2024.144.93.

22. Giri C., Ochieng E., Tieszen L. L., Zhu Z., Singh A., Loveland T., Masek J., Duke N. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. Global Ecology and Biogeography. 2011. Vol. 20, № 1. P. 154–159. DOI 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.

REFERENCES

1. Nguyen Minh, H., Ouillon, S., & Duy Vinh, V. (2022). Sea-level rise in Hai Phong coastal area (Vietnam) and its response to ENSO – evidence from tide gauge measurement of 1960–2020. *Vietnam Journal of Earth Sciences.* https://doi.org/10.15625/2615-9783/16961.

2. Bekmurzayeva, L. R., Bratkov, V. V., & Kerimov, I. A. (2025). Assessment of contemporary agroclimatic conditions in the North Caucasus using ground-based meteorological observations and low spatial resolution data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 30(6), 27–35. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-27-35 [in Russian].

3. Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature,* 540, 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584.

4. Zhao, C. et al. (2025). Evaluating spectral indices for water extraction: Limitations and contextual usage recommendations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 139, 104510. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104510.

5. Lappe, R., Ullmann, T., & Bachofer, F. (2022). State of the Vietnamese Coast – Assessing Three Decades (1986 to 2021) of Coastline Dynamics Using the Landsat Archive. *Remote Sensing,* 14(10), 2476. https://doi.org/10.3390/rs14102476.

6. Pham Tien Dat, & Yoshino, K. (2013). Comparing Mangrove Forest Management in Hai Phong City, Vietnam towards Sustainable Aquaculture. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 109–118. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.018.

7. Quyen, D. T., Malinnikov, V. A., Sereke, T. E., & Ngo, X. H. (2024). Mapping tidal flats along the coast of Vietnam using deep learning techniques based on Sentinel-1 imagery. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 29(6), 70–82. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-70-82 [in Russian].

8. Quyen, D. T., & Malinnikov, V. A. (2024). Classification of estuarine and coastal wetlands from Planet NICFI imagery based on convolutional neural networks and transfer learning. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography],* (6), 31–42. https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42 [in Russian].

9. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714.

10. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing,* 27(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

11. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment,* 140, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029.

12. Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment,* 175, 167–182. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.005.

13. Rajeswari, S., & Rathika, P. (2024). Exploring Spectral Indices for Improved Water Body Classification in Landsat Imagery. *In 2024 Third International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS).* Krishnankoil, India: IEEE.

14. Sun, Q., & Li, J. (2024). A method for extracting small water bodies based on DEM and remote sensing images. *Scientific Reports*, 14, 760. https://doi.org/10.1038/s41598-024-51346-7.

15. Esposito, C., Landrum, G. A., Schneider, N., Stiefl, N., & Riniker, S. (2021). GHOST: Adjusting the Decision Threshold to Handle Imbalanced Data in Machine Learning. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 61(6), 2623–2640. https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00160.

16. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2023). Analysis of changes in the natural and anthropogenic transformation of the coastline of the Azerbaijanian sector of the Caspian sea. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 28(4), 85–93. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-4-85-93 [in Russian].

17. Guliyev, A. Sh., Khlebnikova, T. A., & Kalenizkiy, A. I. (2024). Development of a methodology for aerospace monitoring of oil pollution based on the integration of Earth remote sensing data (using the example of the waters of the Azerbaijani sector of the Caspian Sea). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 29(6), 53–61. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-53-61 [in Russian].

18. Kolesnikov, A. A. (2022). Analysis of methods and tools of artificial intelligence for analysis and interpretation of active remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 27(3), 74–94. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94 [in Russian].

19. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment,* 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

20. Henrich, V., Jung, A., Götze, C., Sandow, C., Thürkow, D., & Gläßer, C. (2009). Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. *In Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop*. Tel Aviv, Israel.

21. Pham, Ch., & Pham, D. (2024). Development of a methodology for automatic monitoring of urbanization in the Red River basin (Vietnam). *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal],* 6(144). https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.93 [in Russian].

22. Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., & Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography,* 20(1), 154–159. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.

Об авторах

Данг Хиен Фам – аспирант кафедры географии.

Виталий Викторович Братков – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой географии.

Author details

Dang Hien Pham – PhD Student, Department of Geography.

Vitaly V. Bratkov – DSc, Professor, Head of the Department of Geography.

Получено / Received 23.06.2026
Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2026
Принята к публикации / Accepted 30.09.2026

Научно-практическая статья/Research article
УДК 528.45:528.721.221.6
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-112-121

Мониторинг деформаций объектов городской инфраструктуры Москвы с применением лазерного сканирования и 3D-моделирования

А. Р. Байорис[1]✉, *А. В. Ершов*[1]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: baioris1999@mail.ru

Аннотация. Выполненное исследование направлено на разработку и апробирование методики мониторинга деформаций зданий и сооружений, являющихся объектами кадастровых работ. Для получения необходимых параметров мониторинга в разработанной методике реализована интеграция данных лазерного сканирования и тахеометрической съемки. Исходя из требуемой точности для конкретного жилого объекта выбрано измерительное технологическое оборудование (лазерный сканер RLS-3000 и электронный тахеометр Trimble S7), что обеспечило создание цифровой 3D-модели с точностью определения координат характерных точек 2 мм. Для математической обработки результатов измерений было предложено использовать алгоритм ICP, а для автоматической классификации дефектов – метод опорных векторов. В результате применения предложенной методики на исследуемом объекте капитального строительства установлено прогрессирующее развитие трещин с раскрытием от 0,3 до 1,5 мм в год и зафиксировано горизонтальное смещение фундамента на 10,2 мм. Построенные по этим данным графики динамики деформаций и гистограммы распределения дефектов подтверждают эффективность предложенной методики и целесообразность ее применения при выполнении геодезического мониторинга на других объектах капитального строительства.

Ключевые слова: лазерное сканирование, мониторинг деформаций, «умный город», 3D-моделирование, облако точек, метод опорных векторов, городская инфраструктура

Для цитирования:
Байорис А. Р., Ершов А. В. Мониторинг деформаций объектов городской инфраструктуры Москвы с применением лазерного сканирования и 3D-моделирования. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 112–121. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-112-121

Deformation monitoring of Moscow's urban infrastructure using terrestrial laser scanning and 3D modeling

A. R. Bayoris[1]✉, *A. V. Ershov*[1]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: baioris1999@mail.ru

© А. Р. Байорис, А. В. Ершов, 2026

Abstract. The study introduces and validates a high-fidelity structural health monitoring framework specifically designed for real estate cadastral applications and asset lifecycle management. The proposed methodology synergizes Terrestrial Laser Scanning and high-precision total station observations to resolve comprehensive 3D deformation vectors. Instrument selection (the RLS-3000 laser scanner and Trimble S7 total station) was governed by stringent project-specific accuracy thresholds, enabling the reconstruction of a centimeter-level reality model characterized by point cloud registration residuals not exceeding 2 mm. To process the acquired multimodal datasets, the authors employed the Iterative Closest Point algorithm for sub-millimetric fine registration and change detection, while a Support Vector Machine classifier was implemented for automated structural defect classification. Field validation on the target structure revealed active deterioration dynamics, quantified as progressive crack propagation ranging from 0.3 to 1.5 mm/year and a cumulative horizontal foundation displacement of 10.2 mm. Time-series analysis and statistical distribution histograms derived from these measurements substantiate the methodological robustness and sensitivity of the workflow. Consequently, this integrated approach establishes a new baseline for transitioning from periodic episodic surveys to continuous, data-driven monitoring regimes for critical infrastructure assets.

Keywords: laser scanning, deformation monitoring, smart city, 3D modeling, point cloud, support vector machine (SVM), urban infrastructure

For citation:
Bayoris A. R., Ershov A. V. (2026). Deformation monitoring of Moscow's urban infrastructure using terrestrial laser scanning and 3D modeling. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 112–121. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-112-121

Введение

Эксплуатационная безопасность и долговечность объектов городской инфраструктуры являются критически важными факторами устойчивого развития мегаполисов. В условиях Москвы, где значительная часть жилого фонда и инженерных сетей эксплуатируется десятилетиями, проблема старения и износа конструкций усугубляется ростом нагрузок и воздействием техногенных факторов. Статистика последних лет фиксирует рост аварийности на инженерных сетях центральных районов Москвы [1, 2], что требует перехода к предиктивному обслуживанию городской инфраструктуры, являющемуся не только ключевым элементом концепции «умного города», но и важнейшей задачей современного геодезического обеспечения кадастровых работ, направленного на поддержание актуальности сведений об объектах недвижимости [3–6].

Существующие традиционные методы геодезического мониторинга (нивелирование, тахеометрическая съемка выборочных точек) обеспечивают необходимую точность, но обладают низкой пространственной детализацией, высокой трудоемкостью и не позволяют сформировать целостную цифровую модель объекта для комплексного анализа. В свою очередь, активно развивающиеся технологии дистанционного зондирования, такие как аэрофотосъемка, обеспечивают широкий охват, но недостаточны для фиксации деформаций с требуемой для конструкций точностью в несколько миллиметров. Несмотря на успешное применение интегрированных методов лазерного сканирования и фотограмметрии для контроля строительных работ [7], для мониторинга деформаций необходим подход, обеспечивающий субмиллиметровую точность.

Технология наземного лазерного сканирования (НЛС) позволяет преодолеть эти ограничения, обеспечивая создание трехмерных моделей объектов в виде облаков точек. В последние годы накоплен значительный опыт применения НЛС для мониторинга исторических памятников, уникальных строительных объектов и промышленных сооружений [8–11]. Однако вопросы комплексного использования НЛС для синхронного мониторинга массовой жилой застройки и сопряженных с ней линейных инженерных объектов (таких

как линии электропередачи) в условиях плотной городской застройки, а также методики автоматизированного анализа получаемых разновременных данных для целей «умного города» остаются разработанными недостаточно. В частности, требуют дальнейшего исследования и адаптации алгоритмы сравнения облаков точек (ICP – Iterative Closest Point) [12] и методы машинного обучения для классификации типов дефектов [13].

Целью данного исследования является разработка и апробация методики геодезического мониторинга деформаций зданий и сооружений, являющихся объектами кадастровых работ, с использованием данных лазерного сканирования, обеспечивающей получение количественных данных, необходимых для актуализации сведений кадастрового учета и долгосрочного прогнозирования технического состояния объектов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– выполнен комплекс полевых измерений, включающий тахеометрическую съемку и лазерное сканирование жилого дома и линий электропередачи;

– построены 3D-модели объектов в местной системе координат МСК-50 для последующего создания их цифровых двойников;

– разработаны и применены алгоритмы на основе ICP и метода опорных векторов (SVM) для автоматического выявления и классификации деформаций и дефектов по разновременным данным. Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) представляет собой алгоритм машинного обучения с учителем, предназначенный для решения задач бинарной классификации. В контексте настоящего исследования SVM используется для автоматического разделения точек облака на два класса: «фоновая поверхность» (неповрежденные участки фасада) и «дефект» (трещины, сколы, выбоины);

– провести количественный анализ динамики развития дефектов и интерпретировать полученные результаты для целей предиктивного обслуживания городской инфраструктуры.

Научная новизна статьи заключается в разработке методики мониторинга, адаптированной к требованиям кадастрового учета и сочетающей тахеометрическую съемку для контроля смещений с лазерным сканированием для получения детальной непрерывной модели поверхности и деформаций, а также в адаптации алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации дефектов конструкций на основе облаков точек, что позволяет формировать пространственные данные, пригодные для целей 3D-кадастра [13].

Методы и материалы

В качестве объекта мониторинга выбрано жилое здание высотой 50 м, расположенное в центральном административном округе г. Москвы и являющееся типичным объектом капитального строительства, подлежащим кадастровому учету, а также прилегающие к нему воздушные линии электропередачи (ЛЭП), проходящие на расстоянии до 50 м от здания. Выбор объекта обусловлен его представительностью для застройки данного типа, длительным сроком эксплуатации (более 40 лет) и наличием визуально наблюдаемых трещин на фасаде, что свидетельствовало о потенциальной активности деформационных процессов и требовало актуализации сведений о его техническом состоянии. Исследования включали пять измерительных циклов с интервалом 3 месяца. Основной массив данных для сравнения облаков точек получен в начальном и конечном циклах (интервал 12 месяцев), промежуточные наблюдения за раскрытием трещин выполнены тахеометрическим методом.

Для измерения раскрытия трещин использовался тахеометр Trimble S7 в режиме высокоточного измерения расстояний (СКО 0,5 мм на отражающую пленку), что позволило регистрировать изменения с субмиллиметровой точностью. Лазерное сканирование применялось для общей оценки геометрии и выявления зон концентрации дефектов, тогда как количественные параметры трещин (0,3–1,5 мм) определены по данным тахеометрических наблюдений за деформационными марками, установленными поперек трещин.

Выбор оборудования и методики измерений обеспечивает соответствие требованиям действующих нормативных документов к точности

геодезического мониторинга деформаций (ГОСТ 24846–2019, СП 126.13330.2017). Для зданий I и II уровня ответственности, к которым относятся жилые многоквартирные дома, СКО определения смещений по цифровым моделям не должна превышать 2 мм. Достигнутая в настоящем исследовании точность построения 3D-моделей 2 мм полностью удовлетворяет этому требованию и позволяет достоверно фиксировать деформации, значимые для оценки технического состояния объекта. Аналогичные подходы к обеспечению высокой точности мониторинга с использованием НЛС описаны в работах [8, 10].

Обработка данных выполнялась с использованием следующего программного обеспечения:

– Faro Scene 2022 – для первичной обработки облаков точек (сшивка, фильтрация, окраска);

– Autodesk AutoCAD Civil 3D 2023 – для создания векторных 3D-моделей и проведения измерений;

– CloudCompare, V 2.12.4 – для сравнения разновременных облаков точек алгоритмом ICP [12];

– ПО на базе библиотек Python (Scikit-learn) – для реализации алгоритма машинного обучения SVM (Support Vector Machine) с целью классификации дефектов [13].

Полевой этап включал последовательное выполнение следующих операций:

– создание опорной геодезической сети выполнено путем закладки на устойчивых участках территории вокруг объекта сети из 8 пунктов, координаты и высоты которых определены в замкнутых тахеометрических ходах в местной системе координат МСК-50 и Балтийской системе высот 1977 г. Данная сеть служила долговременной стабильной основой для всех измерений. Схема геодезических построений представлена на рис. 1;

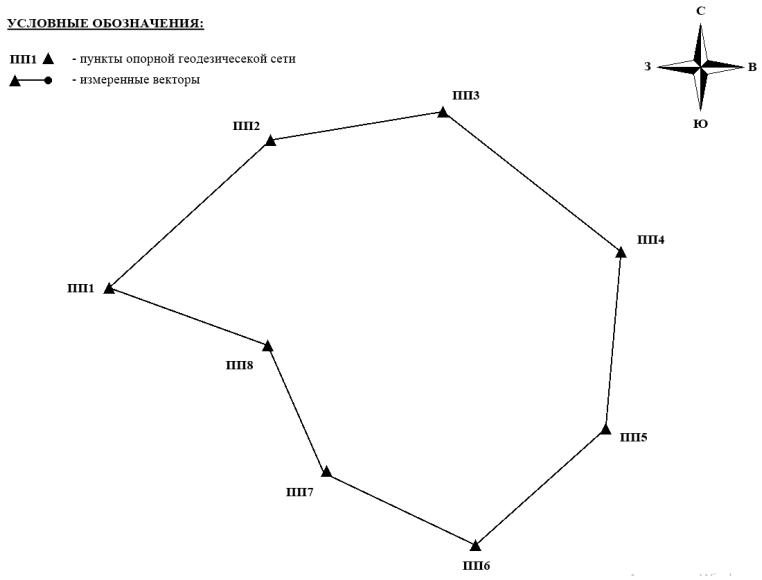


Рис. 1. Схема геодезических построений

– тахеометрическая съемка включала определение с опорных пунктов координат реперных марок, жестко закрепленных на цоколе, углах и перекрытиях здания, а также на опорах ЛЭП. Кроме того, тахеометром были определены координаты сканерных целей (сферических и плоских), которые впоследствии использовались для геопривязки облаков точек. Для оценки точности были выполнены контрольные измерения и уравнивание сети. Погрешность положения реперов, оцененная как СКО из результатов уравнивания, в плане и по высоте не превысила 2 мм.

Лазерное сканирование выполнялось с восьми станций, расположенных на расстояниях 20–40 м от сканируемых поверхностей, что обеспечило измерения с паспортной точностью сканера RLS-3000 (±2 мм на 50 м).

Плотность сканирования на объекте составляла 3 мм на расстоянии 10 м.

Методика камеральной обработки и анализа данных содержит следующие этапы:

– построение единого облака точек выполнено в программной среде Faro Scene путем сшивания данных со всех станций сканирования с использованием геодезических (сканировочных) целей. Для удаления выбросов проведена фильтрация шумов алгоритмом Statistical Outlier Removal (SOR) [14];

– создание 3D-модели осуществлялось в AutoCAD Civil 3D, куда было импортировано отфильтрованное облако точек и на его основе построена триангуляционная (TIN) / поверхностная модель здания и линейных объектов (ЛЭП);

– математическая обработка разновременных данных выполнялась с использованием алгоритма ICP в среде CloudCompare. Попарное сравнение облаков, полученных с интервалом в 1 год, с параметром максимального расстояния сопоставления 5 мм [12] позволило построить карты расстояний, визуализирующие зоны смещений и дающие количественную оценку деформаций;

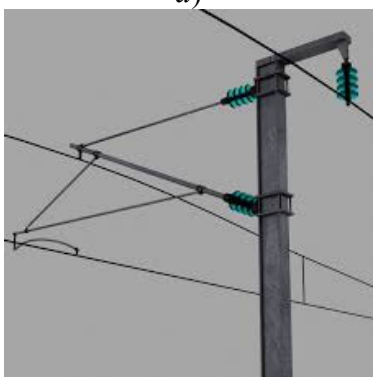
– автоматическое выявление дефектов с использованием SVM заключалось в классификации участков облака точек на «фоновую поверхность» и «дефект» (трещины, сколы) с помощью метода опорных векторов [13]. Признаками для обучения модели служили дисперсия нормалей в окрестности точки, среднеквадратическое отклонение высот и градиент поверхности. Модель обучена на размеченной выборке, содержащей 5 000 примеров «дефект» и 15 000 примеров «фон».

Контроль точности координат характерных точек контура здания, полученных по 3D-модели, был выполнен путем решения обратной геодезической задачи. Сравнивались расстояния и превышения между контрольными точками, измеренные тахеометром Trimble S7, с аналогичными величинами, вычисленными по данным сканирования. Максимальное расхождение не превысило 2 мм, что соответствует требованиям к точности определения координат характерных точек объектов недвижимости, установленным нормативными документами, и подтверждает пригодность модели для кадастровых работ.

Результаты

В результате комплексной обработки данных лазерного сканирования и тахеометрической съемки были построены цифровые 3D-модели объектов исследования. Общее облако точек составило 12 млн измерений. На его основе в программной среде AutoCAD Civil 3D создана 3D-модель жилого дома и прилегающих линий электропередачи (рис. 2). Пространственное положение модели задано в местной системе координат МСК-50 и Балтийской системе высот 1977 г., что обеспечивает ее интеграцию в общегородские информационные системы. Погрешность определения координат характерных точек контура здания, оцененная как максимальное расхождение между координатами, полученными по 3D-модели, и независимыми тахеометрическими измерениями, не превысила 2 мм, что удовлетворяет требованиям к точности кадастровых работ.

а)



б)

Рис. 2. Цифровая 3D-модель здания:

а) вид здания; *б*) линия электропередачи

Сравнение облаков точек, полученных с интервалом в 12 месяцев, с использованием алгоритма ICP [12] позволило количественно оценить смещения элементов конструкций. Анализ выявил устойчивую зону деформаций в области цокольной части здания. Максимальное зафиксированное смещение составило 10,2 мм. Среднеквадратическая погрешность выполнения процедуры ICP, рассчитанная как СКО расстояний между соответствующими точками на стабильных (неизменных) участках фасада после их оптимального выравнивания, составила 1,8 мм, что подтверждает статистическую значимость выявленных смещений.

На основе данных, полученных с помощью алгоритма SVM [13], был проведен анализ развития трещин на фасаде. Для количественной оценки динамики выбраны четыре трещины (T1–T4), обладающие наибольшей протяженностью и четко идентифицируемые на разновременных сканах. Измерения раскрытия выполнялись тахеометром Trimble S7 с интервалом 3 месяца; результаты пяти циклов наблюдений указаны в таблице.

Результаты измерения раскрытия трещин и параметры линейной регрессии

Трещина	Раскрытие, мм, в цикле				Уравнение регрессии*	R^2	Скорость раскрытия, мм/мес.
	3 мес.	6 мес.	9 мес.	12 мес.			
T1	0,40	0,78	1,14	1,50	y = 0,003 + 0,125t	0,997	0,125
T2	0,22	0,49	0,73	1,00	y = –0,004 + 0,083t	0,996	0,083
T3	0,14	0,27	0,43	0,58	y = –0,002 + 0,049t	0,998	0,049
T4	0,08	0,15	0,22	0,31	y = –0,001 + 0,026t	0,997	0,026

* *Примечание*. У – раскрытие трещины, мм; t – время от начала наблюдений, мес.; R^2 – коэффициент детерминации.

Для наиболее активной трещины T1 скорость раскрытия, определенная по линейной модели, составила 0,125 мм/мес. при максимальном раскрытии за год 1,50 мм. Для трещин T2–T4 скорость раскрытия варьировалась от 0,026 до 0,083 мм/мес. Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0,996$) подтверждают устойчивый линейный характер развития деформаций. Графическая интерпретация динамики раскрытия трещин на фасаде дома приведена на рис. 3.

Для выявления закономерностей распределения повреждений по высоте здания была построена гистограмма на основе данных, полученных методом SVM (рис. 4). Анализ показал, что более 65 % всех идентифицированных дефектов (трещин, сколов) сосредоточено в нижней части здания (0–15 м). На высотах от 15 до 35 м расположено около 30 % дефектов, в то время как на верхних этажах (выше 35 м) их доля не превышает 5 %.

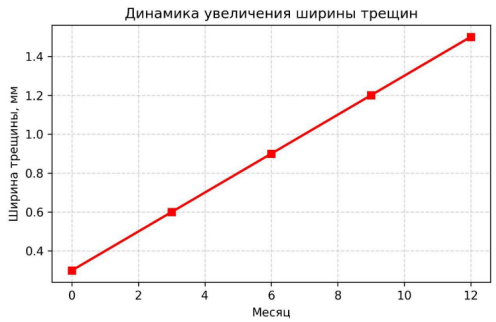


Рис. 3. График динамики раскрытия трещин на фасаде дома

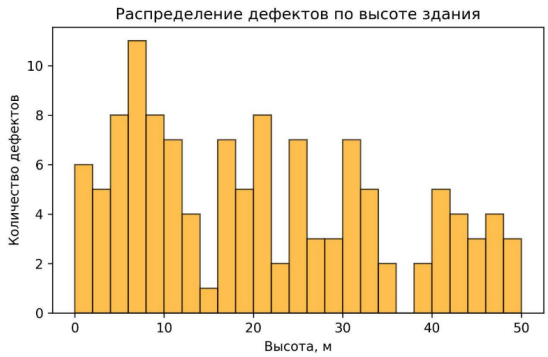


Рис. 4. Гистограмма распределения дефектов по высоте здания

Контроль положения проводов ЛЭП относительно фасада здания показал отсутствие критических изменений за период наблюдений. Максимальное зафиксированное смещение точек крепления проводов на опорах составило 3,1 мм. Данная величина сопоставима с предельной погрешностью метода, что не позволяет однозначно утверждать о наличии деформаций, однако требует продолжения мониторинга для выявления возможного тренда.

Блок-схема разработанной методики представлена на рис. 5.

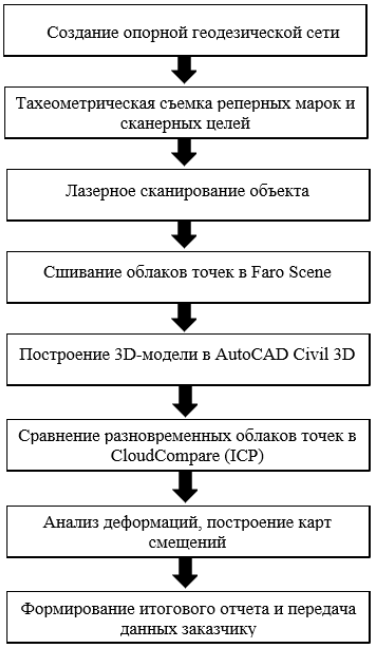


Рис. 5. Блок-схема разработанной методики мониторинга деформаций объектов капитального строительства

Обсуждение

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность комплексного использования тахеометрической съемки и наземного лазерного сканирования для решения задач мониторинга городской инфраструктуры. Полученные результаты позволяют сделать ряд важных выводов, имеющих как методическое, так и прикладное значение:

– горизонтальное смещение фундамента 10,2 мм при погрешности 1,8 мм статистически значимо и свидетельствует о продолжающихся деформациях, типичных для старой застройки. Принципиальное преимущество предложенной методики – не только регистрация величины смещения, но и получение непрерывного поля смещений с точной пространственной привязкой к элементам конструкции, что позволяет локализовать зоны концентрации напряжений и строить прогноз развития дефектов. Это подтверждает ценность облаков точек как геометрической основы цифровых двойников [15];

– линейный характер смещений (см. рис. 3) указывает на постоянство действующих факторов (ползучесть, вибрации, гидрогеологические колебания); установление точных причин потребует дополнительных инженерно-геологических изысканий;

– установленная по данным регрессии линейная зависимость раскрытия трещин ($R^2 \geq 0{,}996$, скорость до 0,125 мм/мес.) свидетельствует о прогрессирующем характере деформаций под действием постоянных факторов. Использование SVM обеспечило объективную количественную оценку дефектов, что повышает надежность прогноза [13];

– концентрация более 65 % дефектов в нижней зоне (0–15 м), представленная на гистограмме (см. рис. 4), объясняется максимальными весовыми нагрузками и воздействием влаги, реагентов и перепадов температур. Это необходимо учитывать при планировании ремонтных работ.

Практическая значимость и ограничения: разработанная методика геодезического мониторинга позволяет не только констатировать текущее состояние, но и строить краткосрочный прогноз развития деформаций. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы для актуализации сведений Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН), подготовки технических планов и ведения 3D-кадастра. Методика может быть рекомендована для выполнения геодезического мониторинга деформаций на других объектах капитального строительства, сведения о которых подлежат внесению в ЕГРН. Интеграция таких данных в платформу «умного города» позволит перейти к предиктивной модели управления инфраструктурой, ми-

нимизирующей риски возникновения аварийных ситуаций [1, 2]. Полученные цифровые модели также могут служить основой для внедрения технологий информационного моделирования зданий (BIM) [16] и цифровых двойников городской среды [15]. Основным ограничением метода является его относительно высокая стоимость и трудоемкость на этапе полевых работ и первичной обработки данных по сравнению с традиционными методами. Однако этот недостаток компенсируется беспрецедентной полнотой и объективностью получаемой информации, что для критически важных объектов является определяющим фактором.

Таким образом, представленные результаты не только подтверждают эффективность примененного методического подхода, но и вносят вклад в понимание механизмов деформации типовой жилой застройки, предоставляя инструментарий для перехода к ее интеллектуальному мониторингу и управлению в рамках концепции «умного города».

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность разработанной методики мониторинга объектов городской инфраструктуры с интеграцией данных лазерного сканирования и тахеометрической съемки [8, 10]. В ходе работы были получены следующие основные результаты и выводы:

– разработана и апробирована методика геодезического мониторинга деформаций объектов капитального строительства, обеспечивающая создание цифровых 3D-моделей с точностью определения координат характерных точек 2 мм, подтвержденной верификацией с тахеометрическими измерениями. Методика включает комплекс полевых измерений и алгоритмы камеральной обработки (ICP, SVM), что позволяет перейти от выборочного контроля к непрерывному пространственному мониторингу и получать данные, пригодные для целей кадастрового учета и 3D-кадастра [11];

– установлены количественные параметры деформационных процессов: с точностью, превышающей погрешность измерений, зафиксировано смещение фундамента здания на 10,2 мм и выявлена линейная динамика раскрытия трещин на фасаде со скоростью до 0,125 мм/мес., что свидетельствует о прогрессирующем характере деформаций;

– выявлена закономерность пространственного распределения дефектов: более 65 % повреждений сосредоточено в нижней части здания (0–15 м), что указывает на определяющую роль факторов влажности, вибрационных нагрузок и эксплуатационного износа в деградации конструкций именно этой зоны;

– подтверждена практическая значимость методики для системы «умного города»: предложенный аналитический подход на основе разновременных 3D-моделей позволяет не только оценивать текущее состояние, но и строить краткосрочный прогноз развития деформаций (например, путем экстраполяции линейного тренда раскрытия трещин). Это демонстрирует возможность перехода от реагирования на уже произошедшие аварии к планированию профилактических работ на основе прогнозируемого технического состояния, что составляет суть предиктивного (прогнозного) подхода к управлению инфраструктурой [1, 2].

Перспективы дальнейших исследований связаны с автоматизацией обработки данных, интеграцией разработанной методики в общегородские геоинформационные системы, а также с адаптацией подхода для мониторинга других типов инфраструктурных объектов (мостов, тоннелей, объектов культурного наследия, подземных коммуникаций [17]).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sanusi B. O. Smart Infrastructure: Leveraging IoT and AI for Predictive Maintenance in Urban Facilities. SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2025. Vol. 17(02). P. 26–37.

2. Singh P. et al. Enhancing smart city infrastructure through IoT-enabled predictive maintenance and real-time data analytics. 2024 International Conference on Progressive Innovations in Intelligent Systems and Data Science (ICPIDS). IEEE. 2024. P. 129–137.

3. Wang J. et al. Progress of standardization of urban infrastructure in smart city. Standards. 2022. Vol. 2(3). P. 417–429.

4. Приоритетные направления внедрения технологий умного города в российских городах. Пространственное развитие: экспертно-аналитический доклад [Электронный ресурс]. URL: https://www.csr.ru/upload/iblock/bdc/bdc711b002e9651fb2763d98c7f7daa6.pdf.

5. Золотых З. А., Борецкий Д. С. Умный город как способ организации городской среды. Тенденции развития науки и образования. 2024. Т. 105. № 13. С. 15–18.

6. Аврунев Е. И., Горобцов С. Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ : монография. Новосибирск : СГУГиТ, 2024. 239 с.

7. El-Omari S., Moselhi O. Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. Automation in construction. 2008. Vol. 18(1). P. 1–9.

8. Mukupa W. et al. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. Survey review. 2017. Vol. 49(353). P. 99–116.

9. Lindenbergh R., Pietrzyk P. Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. Applied Geomatics. 2015. Vol. 7(2). P. 65–74.

10. Шоломицкий А. А., Ханнанов Р. Р., Олейникова Е. А. Особенности обработки и анализа результатов наземного лазерного сканирования при геодезическом мониторинге земляных дамб. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 31–40.

11. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 121–139.

12. Yuan H. et al. Research on the Improved ICP Algorithm for LiDAR Point Cloud Registration. Sensors. 2025. Vol. 25(15). P. 4748.

13. Ge Y. et al. Automated detection and characterization of cracks on concrete using laser scanning. Journal of Infrastructure Systems. 2023. Vol. 29(2). P. 04023005.

14. Qu C. et al. Point clouds outlier removal method based on improved mahalanobis and completion. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022. Vol. 8(1). P. 17–24.

15. Scalas A. et al. Potential of the geometric layer in urban digital twins //ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. Vol. 11(6). P. 343.

16. Талапов В. В. Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. М. : ДМК–Пресс, 2015. 410 с.

17. Lai Q. et al. Structural Analysis and 3D Reconstruction of Underground Pipeline Systems Based on LiDAR Point Clouds. Remote Sensing. 2025. Vol. 17(2). P. 341.

REFERENCES

1. Sanusi, B. O. (2025). Smart Infrastructure: Leveraging IoT and AI for Predictive Maintenance in Urban Facilities. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology, 17*(02), 26–37.

2. Singh, P. et al. (2024). Enhancing smart city infrastructure through IoT-enabled predictive maintenance and real-time data analytics. In *2024 International Conference on Progressive Innovations in Intelligent Systems and Data Science (ICPIDS)* (pp. 129–137). IEEE.

3. Wang, J., Liu, C., Zhou, L., Xu, J., Wang, J., & Sang, Z. (2022). Progress of standardization of urban infrastructure in smart city. *Standards, 2*(3), 417–429.

4. Priority directions for implementing smart city technologies in Russian cities. Spatial development: expert-analytical report. Retrieved from https://www.csr.ru/upload/iblock/-bdc/bdc711b002e9651fb2763d98c7f7daa6.pdf [in Russian].

5. Zolotykh, Z. A., & Boretskii, D. S. (2024). Smart city as a way of organizing the urban environment. *Tendentsii razvitiia nauki i obrazovaniia [Trends in the Development of Science and Education], 105*(13), 15–18 [in Russian].

6. Avrunev, E. I., & Gorobcov, S. R. (2024). *Geodezicheskoe obespechenie kadastrovyh rabot [Geodetic support of cadastral works]*. Novosibirsk: SSUGT, 239 p. [in Russian].
7. El-Omari, S., & Moselhi, O. (2008). Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Automation in Construction, 18*(1), 1–9.
8. Mukupa, W. et al. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review, 49*(353), 99–116.
9. Lindenbergh, R., & Pietrzyk, P. (2015). Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. *Applied Geomatics, 7*(2), 65–74.
10. Sholomitskii, A. A., Khannanov, R. R., & Oleinikova, E. A. (2024). Features of processing and analysis of terrestrial laser scanning results in geodetic monitoring of earth dams. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 29*(2), 31–40 [in Russian].
11. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). Methodology for creating digital three-dimensional models of infrastructure facilities of oil and gas production complexes using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 25*(2), 121–139 [in Russian].
12. Yuan, H. et al. (2025). Research on the Improved ICP Algorithm for LiDAR Point Cloud Registration. *Sensors, 25*(15), 4748.
13. Ge, Y. et al. (2023). Automated detection and characterization of cracks on concrete using laser scanning. *Journal of Infrastructure Systems, 29*(2), 04023005.
14. Qu, C. et al. (2022). Point clouds outlier removal method based on improved mahalanobis and completion. *IEEE Robotics and Automation Letters, 8*(1), 17–24.
15. Scalas, A. et al. (2022). Potential of the geometric layer in urban digital twins. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 11*(6), 343.
16. Talapov, V. V. (2015). *Tekhnologiia BIM: sut' i osobennosti vnedreniia informatsionnogo modelirovaniia zdanii [BIM technology: essence and features of implementing building information modeling]*. Moscow: DMK–Press, 410 p. [in Russian].
17. Lai, Q. et al. (2025). Structural Analysis and 3D Reconstruction of Underground Pipeline Systems Based on LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing, 17*(2), 341.

Об авторах

Александра Ромасовна Байорис – аспирант кафедры землеустройства и кадастров.
Анатолий Викторович Ершов – кандидат технических наук, доцент кафедры землеустройства и кадастров.

Author details

Alexandra R. Bayoris – PhD Student, Department of Land Management and Cadastres.
Anatoly V. Ershov – PhD, Associate Professor, Department of Land Management and Cadastres.

Получено / Received 05.11.2025
Поступила после рецензирования / Revised 22.12.2025
Принята к публикации / Accepted 10.09.2026

Обзорно-аналитическая статья/Review article
УДК 332.3:004.414.23
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-122-133

Эрозия почв в Российской Федерации: анализ процессов, моделирование и стратегии устойчивого землепользования

В. М. Казиев[1], М. Ш. Махотлова[1]✉

[1] Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Российская Федерация

e-mail: m.mahotlova@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается одна из наиболее значимых эколого-экономических проблем Российской Федерации – эрозия почв. Работа посвящена комплексному анализу водной и ветровой эрозий, их специфике, взаимодействию и влиянию на снижение плодородия почв. Целью исследования является разработка методики количественной оценки вклада каждого типа эрозий, создание математической модели их совместного воздействия и прогнозирование долгосрочных последствий в условиях различных сценариев землепользования и изменения климата. В статье использованы методы полевых исследований, системного анализа, теоретические принципы агрохимии и математическое моделирование на основе баланса массы. Представлены статистические данные, демонстрирующие масштабы эрозионных процессов в РФ, и проанализировано их влияние на агрофизические и агрохимические свойства почв, урожайность сельскохозяйственных культур. Разработанная модель позволяет оценить вклад водной и ветровой эрозий, а также их совместного воздействия на деградацию почвенного покрова. На основе проведенного анализа предложены рекомендации по прогнозированию и управлению землепользованием для устойчивого развития сельского хозяйства и охраны почвенных ресурсов. В заключении подчеркивается необходимость комплексного подхода, включающего технологические, экологические, организационные и правовые меры для решения проблемы эрозии почв в России.

Ключевые слова: водная эрозия, ветровая эрозия, деградация почв, эрозионные процессы, борьба с эрозией, кумулятивный эффект, снижение урожайности, аграрный сектор

Для цитирования:
Казиев В. М., Махотлова М. Ш. Эрозия почв в Российской Федерации: анализ процессов, моделирование и стратегии устойчивого землепользования. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 122–133. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-122-133

A deterministic modeling framework for assessing soil erosion dynamics in the Russian Federation: implications for sustainable land management

V. M. Kaziev[1], M. Sh. Makhotlova[1]✉

[1]Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov, Nalchik, Russian Federation

e-mail: m.mahotlova@yandex.ru

© В. М. Казиев, М. Ш. Махотлова, 2026

Abstract. The study addresses one of the most significant ecological and economic challenges facing the Russian Federation – soil erosion. The paper presents a comprehensive analysis of water and wind erosion, examining their specific characteristics, interaction, and impact on soil fertility decline. The objective of the research is to develop a methodology for quantifying the contribution of each erosion type, creating a mathematical model of their combined effects, and forecasting long-term consequences under various scenarios of land-use change and climate dynamics. The study employs field survey methods, systems analysis, theoretical principles of agrochemistry, and mass-balance-based mathematical modeling. It provides statistical data demonstrating the scale of erosion processes in the Russian Federation and analyzes their influence on the agrophysical and agrochemical properties of soils, as well as crop yields. The developed model allows for the assessment of individual contributions from water and wind erosion, as well as their synergistic impact on soil cover degradation. Based on the conducted analysis, recommendations are proposed for forecasting and managing land use to ensure sustainable agricultural development and protect soil resources. In conclusion, the necessity of an integrated approach encompassing technological, ecological, organizational, and legal measures to address soil erosion in Russia is emphasized.

Keywords: water erosion, wind erosion, soil degradation, erosion processes, erosion control, cumulative effect, yield decline, agricultural sector

For citation:
Kaziev V. M., Makhotlova M. Sh. (2026). A deterministic modeling framework for assessing soil erosion dynamics in the Russian Federation: implications for sustainable land management. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 122–133. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-122-133

Введение

Эрозия почв представляет собой одну из наиболее значимых эколого-экономических проблем, актуальных для Российской Федерации. Процесс разрушения и выноса плодородного верхнего слоя земли (гумуса) водными потоками или ветром происходит на обширных пространствах страны – от черноземных районов европейской части до аридных степей юга Сибири, писал основоположник школы научного почвоведения и географии почв В. В. Докучаев.

Процессы водной и ветровой эрозий создают реальные угрозы для устойчивости агропромышленного комплекса, продовольственной безопасности и экологического равновесия. Среди негативных последствий эрозионной динамики следует отметить существенную потерю плодородного слоя, загрязнение водных объектов, сокращение биоразнообразия и формирование овражной сети, отмечал русский советский геоморфолог и гидролог Н. И. Маккавеев.

Деградация земель, обусловленная эрозионными процессами, ведет не только к снижению продуктивности сельскохозяйственных угодий и росту издержек производства, но также оказывает долгосрочное влияние на состояние экосистем и качество жизни населения. В контексте глобальных климатических изменений и усиления антропогенного прессинга проблема эрозии почв требует безотлагательного и системного решения.

Цель настоящего исследования заключается в проведении комплексного анализа эрозионных процессов, выделении их специфики, определении ключевых факторов, позволяющих количественно оценить вклад каждого типа эрозии и их взаимодействия и влияния на снижение плодородия почвы и прогнозирование долгосрочных последствий при различных сценариях землепользования и изменения климата.

Задачами являются:

– проведение комплексного анализа современных эрозионных процессов и выявление специфики и особенностей различных типов эрозии (водная, ветровая) на территории РФ;

– предложение математической модели влияния водной и ветровой эрозий и их взаимодействие;

– разработка рекомендаций по прогнозированию и управлению землепользованием

для устойчивого развития сельского хозяйства и охраны почв в РФ.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы совокупность фактических данных, теоретических принципов агрохимии, полевые эксперименты и современные методы системного анализа, в основе которых лежат теоретико-методологические основы, определяющие лимитирующие факторы плодородия, закон минимума (Ю. фон Либиха), закон оптимума и толерантности (Э. Шелфорда), объясняющий дефицит и избыток элементов питания.

Методика исследования основана на комплексном подходе, комбинирующим два вида эрозии с последующим эмпирическим объединением результатов через общие коэффициенты; математическое моделирование на основе баланса массы, где почва рассматривается как слой, из которого частицы удаляются либо силой воды, либо силой ветра, в зависимости от того, какая сила превышает свой пороговый уровень.

Результаты исследования

В современном аграрном секторе РФ одной из наиболее актуальных проблем является деградация земель, вызванная водной и ветровой эрозиями. Эрозионные процессы приводят к снижению содержания гумуса, увеличению плотности сложения почвенного покрова и уменьшению его пористости. Ухудшение агрофизических свойств, в свою очередь, провоцирует дальнейшее развитие эрозии, что может привести к полной утрате гумусового слоя.

Эрозия и дефляция почв обладают схожей этиологией, что обуславливает невозможность их изолированного рассмотрения. «Согласно статистическим данным, в структуре деградации почвенного покрова доля водной эрозии составляет около 56 %, ветровая эрозия – дефляция – 28 %, химическая деградация – 12 %, физическая деградация – 4 %» (рис. 1) [1].

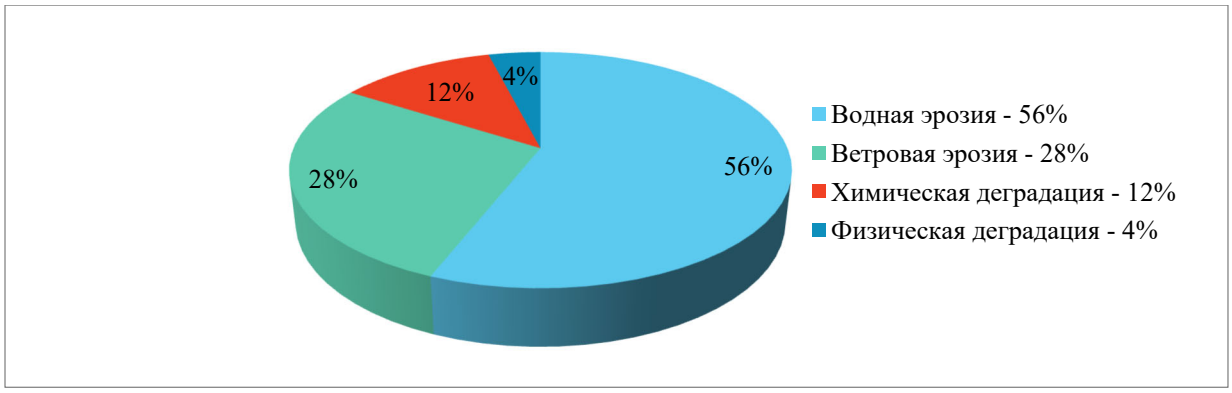


Рис. 1. Статистические данные эрозионных процессов в РФ

Данные рис. 1 показывают, что основными процессами деградации почвенного покрова являются водная и ветровая эрозии.

Интенсификация эрозионных процессов приводит к формированию в пределах сельхозугодий негативных элементов мезо- и микрорельефа, таких как промоины, рытвины и овраги. Их развитие трансформирует продуктивные земельные ресурсы в малопригодные [2]. Сопутствующим эрозии процессом является латеральный перенос смытой почвенной массы в речные системы и акватории водоемов. Данный процесс индуцирует их интенсивное заиление, что влечет за собой деградацию водных экосистем.

Помимо прямого ущерба, связанного с физической потерей почвенной массы, эрозия сопровождается существенной деградацией ее агрохимического потенциала. Происходит значительное снижение концентрации в почве биогенных элементов азота, подвижных форм фосфора и калия, широкого спектра эссенциальных микроэлементов, включая йод, медь, цинк, кобальт, марганец, никель и молибден [3, 4]. Кроме того, эрозия интенсифицирует проявление почвенной засухи. Это связано как с поте-

рей влаги за счет поверхностного стока, так и с увеличением непродуктивных потерь влаги из эродированных почвенных слоев вследствие ухудшения их физических свойств.

Табл. 1 демонстрирует масштабы эрозионных процессов в РФ и динамику изменений площадей, подверженных различным видам деградации.

Таблица 1. Масштабы эрозионных процессов и динамика изменений площадей, подверженных различным видам деградации

Показатель	Значение	Единица измерения	Период/год	Комментарии
Ежегодные потери плодородного слоя почвы	1,5	Млрд т	Ежегодно	Огромные объемы почвы теряются, что напрямую влияет на потенциальную урожайность и требует дополнительных мер по восстановлению плодородия
Годовой прирост площади эродированных почв	0,4–1,5	Млн га	Ежегодно	Диапазон значений показывает вариативность в зависимости от региона, климатических условий и применяемых методов земледелия
Годовой прирост площади оврагов	80–100	Тыс. га	Ежегодно	Овраги – это наиболее радикальная форма эрозии, приводящая к потере земли и нарушению инфраструктуры
Увеличение площади дефлированных земель	123,9	Тыс. га	2001–2025	Значительный прирост площади земель, подверженных ветровой эрозии. Требует особого внимания в засушливых и полузасушливых регионах
Увеличение площади земель, подверженных эрозии и дефляции одновременно	13,6	Тыс. га	2001–2025	Сочетание водной и ветровой эрозий создает наиболее сложные условия для восстановления и требует комплексных подходов к землепользованию

Данная таблица позволяет более четко увидеть проблемные зоны и оценить динамику изменений, что необходимо для разработки эффективных мер по борьбе с эрозией и восстановлению плодородия почв в России.

Уплотнение почвы и прочих субстратов вызывает нарушение воздушно-газового режима и других физических свойств. «В результате изменяются плотность и пористость субстрата, содержание кислорода в корнеобитаемом слое, что приводит к нарушению корневого питания и других физиологических процессов у растений» [5].

При эрозии почва теряет верхний, самый плодородный горизонт, в котором элементы питания растений накапливались тысячелетиями. «Так, если в верхнем слое почвы содержится в среднем 4 % гумуса, а годовой смыв почвы с 1 га, к примеру, равен 25 т, то за год почва потеряет 1 т гумуса. Как известно, общий азот в почве составляет примерно 5 % от содержания гумуса. Следовательно, при годовой потере с 1 га 1 т гумуса из почвы выносится 50 кг общего азота. При среднем содержании в пахотном слое 0,2 % фосфора в результате смыва 25 т почвы с 1 га сносится 50 кг общего фосфора. При содержании в пахотном горизонте 2 % калия его потеря с 1 га при смыве 25 т почвы составляет 500 кг» [6].

Наряду со смывом почвы и потерей питательных веществ при эрозии резко ухудшаются водно-физические свойства почв, что приводит к уменьшению их способности поглощать осадки. В связи с этим на склонах с эродированными почвами наблюдается большой поверхностный сток, особенно при выпадении ливней и интенсивном таянии снега [7].

Большой сток может влиять на урожай, о чем свидетельствуют расчеты. Так, при выпадении интенсивного ливня с количеством осадков 40 мм при коэффициенте стока 0,5 с каждого гектара стекает 200 м^3 воды. Если считать, что в среднем для получения единицы урожая зерна растения расходуют 700–1 000 единиц воды, то только от одного ливня с каждого гектара теряется такое количество воды, которое могло бы обеспечить дополнительное получение 0,2–0,3 т зерна [8].

Деградация почв, вызванная эрозией, истощением питательных веществ, засолением и

другими факторами, напрямую влияет на способность земли обеспечивать оптимальные условия для роста растений.

Когда почва теряет свою структуру и плодородие, растения испытывают дефицит воды, питательных элементов и кислорода, что приводит к снижению урожайности.

Для лучшего понимания масштаба проблемы эта зависимость представлена в виде табл. 2.

Таблица 2. Степень деградации почв, ее влияние на урожайность и последствия

Степень деградации почвы	Влияние на урожайность (приблизительно)	Последствия
Слабая	Снижение на 10–20 %	Небольшое снижение урожайности, возможно увеличение затрат на удобрения и средства защиты растений
Умеренная	Снижение на 20–50 %	Существенное снижение урожайности, ухудшение качества продукции, повышение риска потери урожая в неблагоприятные годы
Сильная	Снижение на 50 % и более	Критическое снижение урожайности, потеря возможности выращивания определенных культур, опустынивание земель, социальные и экономические проблемы

Важно отметить, что эти цифры являются оценочными и могут варьироваться в зависимости от типа почвы, климатических условий, вида культуры и применяемых технологий земледелия. Однако общая тенденция очевидна: чем сильнее деградирована почва, тем ниже урожайность и выше риски для сельского хозяйства [9].

Взаимосвязь между деградацией почвы и урожайностью можно описать как экспоненциальную зависимость. На начальных этапах деградации падение урожайности может быть относительно медленным, но по мере углубления процесса она ускоряется и может привести к полной потере плодородия (табл. 3).

Таблица 3. Зависимость степени деградации на урожайность культур*

Тип деградации	Показатель	Влияние на урожайность
Потеря гумуса	Снижение на 0,1 %	Снижение на 0,5–1,5 %
Уплотнение	Увеличение плотности на 0,1 г/см³	Снижение на 5–15 %
Закисление	Снижение *pH* ниже 5,0	Снижение на 30–60 %
Засоление	Увеличение электропроводности на 1 *dS*/м	Снижение на 10–25 %
Эрозия	Потеря 1 см верхнего слоя	Снижение на 3–8 %

* – степень влияния деградации на урожайность культур зависит от вида культуры и исходного плодородия.

Следует отметить, что структура ущерба, причиняемого деградационными процессами, проявляет системную зависимость, происходит нелинейно и ускоряется с течением времени, определяя продуктивность (урожайность) и стоимость сельскохозяйственной продукции.

Эрозия оказывает существенное негативное влияние на состояние почвенного покрова, а во многих случаях разрушает его полностью. Падает биологическая продуктивность растений, снижаются урожаи и качество всех сельскохозяйственных культур.

Эрозия – это совокупный ущерб от двух типов деградации, которую можно выразить в виде нелинейной математической модели [10].

Предлагаемая модель позволяет количественно оценить вклад каждого типа эрозии и их взаимодействия в снижение плодородия почвы и спрогнозировать долгосрочные последствия при различных сценариях землепользования и изменения климата.

Водная эрозия преимущественно воздействует на верхние, наиболее плодородные горизонты, вынося тонкодисперсные частицы и питательные элементы. Ветровая эрозия также выносит мелкозем, что способствует засыпанию посевов, а в сочетании с водой – усиливает смыв [11].

В рамках модели задаемся основными качественными показателями почвы P_i: C_{org} – содержание органического углерода (гумуса), %.;

N_{otot} – содержание общего азота, %; P_{avi} – содержание доступных форм фосфора и калия, мг/кг; h – мощность гумусового горизонта, см; BD – плотность сложения, г/см³; $Texture$ – гранулометрический состав (содержание физической глины/ила); Agg_{stab} – агрегатная устойчивость, %.

Первоначально смоделируем воздействие водной и ветровой эрозии по отдельности.

Модель водной эрозии:

$$E_w = R \times K \times LS \times C \times P, \qquad (1)$$

где E_w – среднегодовая потеря почвы от водной эрозии, т/га/год;

R – фактор эрозионной опасности осадков;

K – фактор эродируемости почвы есть функция $K = f\ (Texture,\ C_{org},\ Agg_{stab},\ BD)$. Потери гумуса и агрегатов увеличивают K;

LS – топографический фактор (длина и уклон склона);

C – фактор растительного покрова и управления;

P – фактор противоэрозионных практик.

Модель ветровой эрозии:

$$E_d = f\left(I, K_d, C_d, L_d, V\right), \qquad (2)$$

где E_d – среднегодовая потеря почвы от дефляции, т/га/год;

I – показатель эродируемости почвы ветром есть функция $I = f\ (Texture,\ C_{org},\ Agg_{stab},\ BD,\ Увлажненность)$. Сухая, распыленная почва с низким содержанием гумуса имеет высокий I;

K_d – фактор шероховатости поверхности;

C_d – климатический фактор (скорость ветра, влажность воздуха);

L_d – длина неветроустойчивого поля;

V – фактор растительного покрова.

Взаимодействие водной и ветровой эрозий рассматривается как сумма эффектов совместного воздействия (S), процессы которых независимы друг от друга:

$$S = \alpha \times \left(E_w \times E_d\right) / \left(E_w + E_d + \varepsilon\right), \qquad (3)$$

где α – эмпирический коэффициент (α > 0), определяющий силу взаимодействия. Например, предварительный смыв водой может увеличить последующую дефляцию, и наоборот, ветровая эрозия создает микрорельеф, изменяющий LS-фактор для воды;

ε – малая константа, чтобы избежать деления на ноль.

Таким образом, совокупный эрозионный вынос примет форму

$$E_{total} = E_w + E_d + S. \qquad (4)$$

Изменение любого качественного показателя P_i за временной шаг Δt (год) описывается уравнением баланса: вход – выход – потери от эрозии

$$\Delta P_i / \Delta t = Input_i - Output_i - Loss_{erosion-i}, \qquad (5)$$

следовательно,

$$\Delta P_{i(t)} = \beta_i \times \left[E_{w(t)} \times F_{w(Pi)} + E_{d(t)} \times F_{d(Pi)} + \gamma_i \times S_{(t)}\right] \times P_{i(t)} / M_{top(t)}, \qquad (6)$$

где $\Delta P_{i(t)}$ – изменение показателя P_i за год;

β_i – коэффициент обогащения/обеднения для показателя P_i. Для гумуса и питательных элементов $\beta_i \leq 1$, так как эрозия выносит их концентрированно (обогащенный смыв). Для плотных или крупных фракций $\beta_i \approx 1$;

$F_{w(Pi)}$, $F_{d(Pi)}$ – функции селективности эрозии. Показывают, какая доля показателя P_i содержится в выносимом материале. Например, $F_w\ (C_{org}) \approx 2{,}0 - 3{,}0$; $F_d\ (C_{org}) \approx 1{,}5 - 2{,}0$. Для песчаных фракций функция может быть < 1;

γ_i – коэффициент влияния совместного воздействия на показатель P_i;

$M_{top(t)}$ – масса пахотного слоя на единице площади (т/га). Это ключевая переменная состояния, которая сама уменьшается от эрозии: $M_{top(t+1)} = M_{top(t)} - E_{total(t)} \times \Delta t$. Уменьшение массы слоя приводит к концентрированному снижению P_i.

Для оценки общего ущерба введем безразмерный индекс IQD_t – интегральный показатель деградации почвенного качества

$$IQD_t = \sum\left[w_i \times \left(P_{i(t)} / P_{i(0)}\right)\right], \qquad (7)$$

где w_i – вес (важность) показателя, $\Sigma\, w_i = 1$;

$P_{i(0)}$ – исходное (базовое) значение показателя. Если $IQD_t = 1$ – качество не изменилось, IQD_t – < 1 – качество деградировало. Например, IQD_t = 0,7 означает 30-процентную потерю исходного качества.

Модель учитывает важнейшую обратную связь: потери гумуса (C_{org}) и агрегатной устойчивости (Agg_{stab}) ведут к росту факторов эродируемости (K и I), что создает кумулятивный эффект.

Кумулятивный эффект для серии воздействий можно представить в виде аддитивной модели с учетом конкретных деградационных воздействий и прекращения данных воздействий на почву.

$$CI_{total} = Y_{\text{общая}-i} \times 1 - \left(1-k\right)^n / k\,, \quad (8)$$

где CI_{total} – совокупный эффект;

$Y_{\text{общая-}i}$ – общая доля потерь i-й урожайности от деградации – $\sum_{i-1}^{n} D_i$ – суммарный вид воздействия i-й формы совместной деградации;

n – временной отрезок воздействия, год;

k – коэффициент воздействия за период, есть потеря качественных характеристик F от вида деградации.

Модель требует настройки коэффициентов (α, β_i, γ_i, F_w, F_d) на основе данных полевых или лизиметрических экспериментов в конкретном регионе.

В итоге формула (8) выражает экспоненциальную зависимость изменения качественных показателей от интенсивности эрозии, учитывая чувствительность почвы к этому процессу.

Меняя факторы воздействия P_i (севооборот, покровные культуры) и P/V (противоэрозионные приемы), можно моделировать эффективность различных почвозащитных стратегий.

Проведение анализа чувствительности математической модели к изменениям входных параметров представляет собой важный этап подтверждения достоверности и оценки ее надежности [12].

Любые изменения, обусловленные трансформацией почвенного свойства (гранулометрического состава, органического вещества) или антропогенными факторами землепользования, приводят к соответствующему линейному изменению прогнозируемой устойчивости. Следовательно, в регионах с высокой пространственно-временной изменчивостью почвенного покрова критически важной становится задача точной калибровки и периодической актуализации коэффициентов (α, β_i, γ_i, F_w, F_d), а также учет сценариев его возможной эволюции.

Параметры, отражающие интенсивность эрозионного процесса, обладают значительным потенциалом нелинейного воздействия на модель. Даже малые их вариации, вызванные изменениями гидроклиматических характеристик (например, количества и кинетической энергии осадков) или морфометрических показателей рельефа (крутизны, длины склона), могут запускать каскадные увеличение потери гумуса. В условиях горных и предгорных территорий РФ, где рельеф выступает ведущим фактором эрозионных процессов, чувствительность модели относительно показателя их интенсивности проявляется наиболее выраженно. В период с 2020 по 2024 гг. среднегодовые потери почвы на склоновых землях КБР, Ставропольского и Краснодарского краев составляют 10–15 т/га. На отдельных участках, где применяется традиционная вспашка, потери достигают 25–30 т/га. Участились случаи формирования оврагов после ливневых дождей (прирост до 5–10 га в год в отдельных районах) [13].

Таким образом, количественная оценка чувствительности модели позволяет идентифицировать наиболее уязвимые звенья расчетной схемы, определить пороговые значения влияния и обосновать необходимость приоритетных исследований, направленных на уточнение этих параметров.

Оценка интенсивности эрозионных процессов почв на территории Российской Федерации требует применения интегральной методологии, объединяющей натурные исследования, анализ ретроспективных и актуальных данных, а также математическое моделирование [14]. Ниже представлена поэтапная схема организации работ:

– натурные (полевые) исследования – формирование сети мониторинговых полиго-

нов, репрезентативных для основных типов землепользования, классов крутизны и экспозиции склонов. На них предусматривается систематическое измерение величин смыва почвы, оценка структурного состояния, гранулометрического состава и содержания органического углерода. Отобранные образцы используются для лабораторных анализов и последующей калибровки прогностических моделей;

– анализ существующих информационных ресурсов – привлечение материалов дистанционного зондирования (спутниковые и аэрофотоснимки) для оценки динамики растительного покрова и степени деградации земель. Обработка метеорологических данных (осадки, температурный режим, скорость ветра) с целью расчета климатического показателя эрозионной опасности. Использование архивных материалов по землеустройству и цифровых почвенных карт;

– моделирование эрозионно-кумулятивных процессов – применение эмпирических и физико-математических моделей для расчета интенсивности эрозии в различных ландшафтных условиях. Тестирование и калибровка моделей на основе данных полевого мониторинга. Разработка серии картографических продуктов, отображающих пространственное распределение эрозионной угрозы, а также прогноз ее изменения во времени;

– определение коэффициентов эрозионной чувствительности на основе лабораторных исследований устойчивости почв к размыву с учетом типа землепользования и характеристик растительного покрова [15]. Агрегация справочных значений из баз данных и научной литературы. Проведение статистического анализа и геостатистического моделирования для оценки пространственной вариабельности в пределах территории РФ.

Таким образом, полная достоверность параметров интенсивности совместной эрозии возможна лишь при изучении факторов эрозионной пропорциональности и совмещении разнородных данных полевых исследований с данными моделирования эрозионных процессов [16]. Реализация данного подхода позволит создать достоверные карты эрозионных рисков, осуществлять прогноз динамики деградации почв и формировать научно обоснованные решения в сфере управления земельными ресурсами.

Для оптимизации процесса реализации указанных мер целесообразно предложить следующий комплекс научно-организационных мероприятий:

– формирование интегрированной информационной системы: консолидация разнородных данных (результатов полевых исследований, материалов дистанционного зондирования Земли, метеорологических наблюдений, картографических данных о почвенном покрове и др.) в единую структурированную базу данных, обеспечивающую доступность и совместимость информации для исследовательского сообщества;

– усиление межведомственной координации: установить устойчивые механизмы взаимодействия между организациями и ведомствами, осуществляющими деятельность в сфере изучения и управления земельными ресурсами (Росгидромет, Россельхознадзор, Минсельхоз и др.), с целью интеграции методологических и информационных ресурсов;

– развитие кадрового потенциала: организация системной подготовки специалистов, владеющих современными компетенциями в области исследования эрозионных процессов, методов полевой диагностики, технологий дистанционного зондирования, математического моделирования и статистической обработки данных;

– разработка стратегического документа национального уровня: создание научно обоснованной национальной стратегии по противодействию почвенной эрозии, учитывающей региональную специфику и основанной на актуальных данных мониторинга;

– внедрение инновационных технологических решений: активное применение современных инструментов, таких как геоинформационные системы (ГИС), беспилотные авиационные комплексы (БПЛА) и методы искусственного интеллекта, для повышения точности и оперативности мониторинга, а также прогнозного моделирования эрозионной динамики.

Реализация данного комплекса мер позволит сформировать целостную систему полу-

чения достоверных и симптоматических данных об эрозии почв на территории Российской Федерации, что создаст основу для разработки научно обоснованных мероприятий по предотвращению деградации земель и обеспечению устойчивого использования почвенных ресурсов.

Заключение

Анализ эрозионных процессов и современных подходов с деградацией почв в Российской Федерации показывает, что проблема является комплексной и требует постоянного внимания.

Результаты и методики, представленные в статье, находятся на переднем крае современной науки о почвах и экологии, в разрезе которых авторы предлагают разнообразные решения. Главными среди них являются:

1) технологический подход – точное земледелие. Внедрение инновационных агротехнологий, таких как террарийное земледелие, системы капельного и дождевого полива с контролем, применение ортогидропонных систем, использование укрытий и др. Эти методы направлены на оптимизацию водного режима и снижение эрозионной нагрузки на почву;

2) экологический подход. Борьба с деградацией почв невозможна без восстановления и сохранения природных ресурсов. Это создание и охрана необлесенных зон, рекультивация земель, организация зеленых зон в городах и на перекрестках дорог для защиты от ветровой эрозии;

3) организационный и правовой подход. Прогнозирование долгосрочных последствий при различных сценариях землепользования. Укрепление нормативной базы, строгий контроль за соблюдением охранных мероприятий, создание эффективных механизмов государственного регулирования, межведомственной координации и стратегического планирования.

Проведенное исследование эрозионных процессов в Российской Федерации и разработанные методики количественной оценки, моделирования и прогнозирования находятся в русле актуальных мировых научных трендов в области агроэкологии, устойчивого землепользования, мониторинга земель. Основные положения и результаты работы демонстрируют высокую степень соответствия современным научным подходам.

В заключение можно констатировать, что борьба с эрозией и деградацией почв в России – это постоянная и важная задача, решение которой напрямую влияет на продовольственную безопасность страны, состояние окружающей среды и благополучие населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Литвин Л. Ф., Голосов В. Н. Современная динамика факторов эрозии почв на территории России. Эрозия почв и русловые процессы. М., 2022. С. 36–66.

2. Головин П. Н., Богданов В. Л. Применение ГИС-технологий для оценки и повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель в агроландшафтах на основе дистанционных и полевых данных. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 1. С. 73–87. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-73-87.

3.Тишина Р. Д. Информация о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения в РФ: достоверность и перспективы. Экономика, управление и цифровые технологии в АПК 2022 : сборник трудов, приуроченных к Международному научному студенческому форуму, посвященному 100 лет Института экономики и управления АПК Российского государственного аграрного университета МСХА имени К. А. Тимирязева. 2022. С. 111–113.

4. Есжанова Т. С., Ильиных А. Л. Проблемы устойчивого развития и его задачи в сфере земельных отношений, землеустройства и кадастра. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 6. С. 99–104. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-6-99-104.

5. Носов А. В., Позубенкова Э. И., Гурьянова Н. М. Состояние и пути повышения использования земель сельскохозяйственного назначения Пензенской области. Нива Поволжья. 2022. № 3 (63). С. 1003. DOI 10.36461/NP.2022.63.3.006.

6. Жумагалиева Н., Айтхожаева Г., Пентаев Т., Жилдикбаева А. Анализ проблем неиспользования земель сельскохозяйственного назначения с учетом их деградации. Ізденістер, Нәтижелер. 2024. № 1 (101). С. 101–111. DOI 10.37884/1-2024/22.

7. Новиков А. В., Хабарова И. А., Хабаров Д. А., Скрипко Е. С. Предложения по предотвращению деградации земель сельскохозяйственного назначения. Вектор ГеоНаук. 2022. Т. 5, № 4. С. 13–17. DOI 10.24412/2619-0761-2022-4-13-17.

8. Kellogg Ch. E. Soil and Land Classification. American Journal of Agricultural Economics. 1951. Vol. 33, Issue 4. Part 1. P. 499–513.

9. Хакбердиев О. Э., Шамсиддинов Т. Ш. Деградация почв и влияние эрозии на агрохимические свойства почв. International Independent Scientific Journal. 2020. № 13-2 (13). С. 27–29.

10. Stocker C., Koeva M., Nkerabigwi P., Zevenbergen J. UAV Technology: Opportunities to Support the Updating Process of the Rwandan Cadastre. FIG Working Week 2020. Smart Surveyors for Land and Water Management. 2020. Amsterdam, Netherlands.

11. Сейдуллаев Б., Пиргулыев Б., Ишангулыев Д. Причины эрозии почвы и способы борьбы с ней. Академическая публицистика. 2024. № 9-1. С. 48–51.

12. Сасиков А. С., Сатрачев Р. З., Шикова Д. З. Эффективность использования земель сельскохозяйственного назначения. Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты. Материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик, 2025. С. 166–169.

13. Выродова Е. С. О некоторых причинах деградации почв Ставропольского края. Экономика и управление. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Новочеркасск, 2023. С. 212–216.

14. Спиридонычев В. А. Физические методы исследования почв и эрозии почв. Проблемы развития малого и среднего бизнеса в сельском хозяйстве в условиях цифровой экономики. Материалы II Международной научно-практической конференции. Казань, 2024. С. 378–381.

15. Рябцева Н. А., Немолякин В. П., Лукичев Е. А. Основные направления деградации почв ростовской области и закономерности их развития. Инновационные пути решения актуальных проблем АПК России. Материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции. В 2-х т. Персиановский, 2023. С. 85–89.

16. Моисеев К. Г., Терлеев В. В., Смирнов Н. С. Топологическая размерность структуры почвы и некоторые аспекты деградации почв. Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия: сборник докладов XVIII Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В. В. Докучаева». Курск, 2023. С. 204–208.

REFERENCES

1. Litvin, L. F., Golosov, V. N. (2022). Modern dynamics of soil erosion factors in Russia Sovremennaya dinamika faktorov erozii pochv na territorii Rossii. *V sbornike: eroziya pochv i ruslovyye protsessy [In the collection: soil erosion and riverbed processes].* 36–66. Moscow [in Russian].

2. Golovin, P. N., Bogdanov, V. L. (2024). The use of GIS technologies to assess and improve the efficiency of agricultural land use in agrolandscapes based on remote and field data *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT*], Vol. 29. No. 1, 73–87. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-73-87 [in Russian].

3. Tishina, R. D. (2022). Information on the condition and use of agricultural land in the Russian Federation: reliability and prospects *V sbornike: Ekonomika, upravleniye i tsifrovyye tekhnologii v APK 2022. Sbornik trudov, priurochennykh k Mezhdunarodnomu nauchnomu studencheskomu forumu, posvyashchennomu 100-let Instituta ekonomiki i upravleniya APK Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta MSKHA imeni K. A. Timiryazeva [In the collection: Economics, Management and digital technologies in the agro−industrial complex - 2022. A collection of papers dedicated to the International Scientific Student Forum dedicated to the 100th anniversary of the Institute of Economics and Management of the Agro-Industrial Complex of the Russian State Agrarian University named after K. A. Timiryazev]* (pp.111–113). Moscow [in Russian].

4. Eszhanova, T. S., Ilinykh, A. L. (2023). Problems of sustainable development and its tasks in the field of land relations, land management and cadastre *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT*], Vol. 28. No. 6, 99–104. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-6-99-104 [in Russian].

5. Nosov, A. V., Pozubenkova, E. I., Guryanova, N. M. (2022). The state and ways to increase the use of agricultural land in the Penza region. *Niva Povolzhya [The field of the Volga region].* No. 3 (63), 1003. DOI 10.36461/NP.2022.63.3.006.

6. Zhumagalieva, N., Aitkhozhayeva, G., Pentaev, T., Zhildikbaeva, A. (2024). Analysis of problems of non-use of agricultural land, taking into account their degradation. *Izdenister, Nətijeler [Izdenister, Natizheler].* No. 1 (101), 101–111. DOI 10.37884/1-2024/22 [in Russian].

7. Novikov, A. V., Khabarova, I. A., Khabarov, D. A., Skripko, E. S. (2022). Proposals to prevent degradation of agricultural land *[Vektor GeoNauk.] Vector Geosciences.* Vol. 5. No. 4, 13–17. DOI 10.24412/2619-0761-2022-4-13-17 [in Russian].

8. Kellogg, Ch. E. (1951). Soil and Land Classification. American Journal of Agricultural Economics. Vol. 33, Issue 4. Part 1, 499–513.

9. Khakberdiev, O. E., Shamsiddinov, T. S. (2020). Soil degradation and the effect of erosion on agrochemical properties of soils. *International Independent Scientific Journal*. No. 13-2 (13), 27–29. [in Russian].

10. Stocker, C., Koeva, M., Nkerabigwi, P., Zevenbergen, J. (2020). UAV Technology: Opportunities to Support the Updating Process of the Rwandan Cadastre. *FIG Working Week Smart Surveyors for Land and Water Management.* Amsterdam, Netherlands.

11. Seydullaev, B., Pirgulyev, B., Ishangulyev, D., (2024). Causes of soil erosion and ways to combat it *Akademicheskaya publitsistika [Academic journalism].* No. 9-1, 48–51 [in Russian].

12. Sasikov, A. S., Satrachev, R. Z., Shikova, D. Z. (2025*).* Efficiency of agricultural land use *V sbornike: aktual'nyye problemy agrarnoy nauki: prikladnyye i issledovatel'skiye aspekty. Materialy v Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii. [In the collection: actual problems of agricultural science: applied and research aspects. Materials of the v All-Russian (national) scientific and practical conference].* (pp. 166–169). Nalchik [in Russian].

13. Vyrodova, E. S. (2023). About some of the causes of soil degradation in the Stavropol Territory. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. [In the collection: Economics and Management. Materials of the All-Russian scientific and practical conference].* (pp. 212–216). Novocherkassk [in Russian].

14. Spiridonychev, V. A. (2024). Physical methods of soil research and soil erosion. *V sbornike: Problemy razvitiya malogo i srednego biznesa v sel'skom khozyaystve v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. [In the collection: Problems of development of small and medium-sized businesses in agriculture in the digital economy. Materials of the II International Scientific and Practical Conference].* (pp. 378–381). Kazan [in Russian].

15. Ryabtseva, N. A., Nemolyakin, V. P., Lukichev, E. A. (2023). The main directions of soil degradation in the Rostov region and patterns of their development. *V sbornike: Innovatsionnyye puti resheniya aktual'nykh problem APK Rossii. Materialy vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh tomakh [In the collection: Innovative ways to solve urgent problems of the Russian agro-industrial complex. Materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference. In 2 volumes].* (pp. 85–89). Persianovsky [in Russian].

16. Moiseev, K. G., Terleev, V. V., Smirnov, N. S. (2023). Topological dimension of soil structure and some aspects of soil degradation. *V sbornike: Aktual'nyye problemy pochvovedeniya, ekologii i zemledeliya. Sbornik dokladov XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Kurskogo otdeleniya MOO «Obshchestvo pochvovedov imeni V.V. Dokuchayeva». [In the collection: Actual problems of soil science, ecology and agriculture. Collection of reports of the XVIII International Scientific and practical Conference of the Kursk branch of the NGO "Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev"].* (pp. 204–208). Kursk [in Russian].

Об авторах

Валерий Михайлович Казиев – кандидат экономических наук, доцент кафедры землеустройства и экспертизы недвижимости.

Маратина Шагировна Махотлова – кандидат биологических наук, доцент кафедры землеустройства и экспертизы недвижимости.

Author details

Valery M. Kaziev – PhD, Associate Professor, Department of Land Management and Real Estate Expertise.

Maratina Sh. Makhotlova – PhD, Associate Professor, Department of Land Management and Real Estate Expertise.

Получено / Received 22.12.2025
Поступила после рецензирования / Revised 26.01.2026
Принята к публикации / Accepted 10.09.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article
УДК 332.3:631.6
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-134-145

О проектах рекультивации как составляющей государственного фонда данных землеустройства

К. П. Карташова[2]✉, А. В. Дубровский[1], Д. В. Кубраков [3], В. И. Татаренко[1]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] ФГБУ «Россельхозземмониторинг», г. Москва, Российская Федерация
[3] Алтайский центр недвижимости и государственной кадастровой оценки, г. Барнаул, Российская Федерация

e-mail: zksenaya@gmail.com

Аннотация. В статье исследуется проблема неполноты и неравномерности наполнения государственного фонда данных землеустройства проектами рекультивации нарушенных земель. Несмотря на то что в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации проекты рекультивации отнесены к землеустроительной документации и подлежат обязательной передаче в фонд данных, на практике наблюдается системное неисполнение этой обязанности. На основе анализа официальных ответов территориальных органов публично-правовой компании «Роскадастр» по шести субъектам Российской Федерации выявлены значительные региональные диспропорции: от полного отсутствия проектов рекультивации в муниципальных районах Алтайского края до 873 проектов в Кемеровской области. При этом во всех исследованных регионах ведется активная хозяйственная деятельность, сопряженная с нарушением земель (добыча полезных ископаемых, сельскохозяйственное производство, строительные работы и др.), что подтверждается данными официальных источников по лицензированию и результатами анализа космоснимков территорий. Отсутствие проектов рекультивации в фонде данных нарушает конституционное право граждан на достоверную информацию об экологическом состоянии территорий и затрудняет рациональное планирование землепользования. В качестве решения обозначенных проблем предложено дополнить постановление Правительства Российской Федерации от 29.05.2025 № 781 «Об утверждении Правил проведения рекультивации и консервации земель» механизмом обязательной передачи проектов рекультивации в Роскадастр, установить административную ответственность за непредоставление данной документации, обеспечить междведомственный обмен данными между Росреестром, Росприроднадзором и Россельхознадзором. Результаты исследования имеют значение для совершенствования системы управления земельными ресурсами и обеспечения экологической безопасности территорий Российской Федерации.

Ключевые слова: рекультивация земель, государственный фонд данных землеустройства, проект рекультивации, нарушенные земли, Роскадастр, землеустроительная документация, межведомственное взаимодействие

Для цитирования:
Карташова К. П., Дубровский А. В., Кубраков Д. В., Татаренко В. И. О проектах рекультивации как составляющей государственного фонда данных землеустройства. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 134–145. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-134-145

© К. П. Карташова, А. В. Дубровский, Д. В. Кубраков, В. И. Татаренко, 2026

On the System of Regional Specially Protected Natural Areas of Russia

K. P. Kartashova[2]✉, A. V. Dubrovsky[1], D. V. Kubrakov[3], V. I. Tatarenko[1]

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Russian Agricultural Land Monitoring Center, Moscow, Russian Federation
[3] Altai Center for Real Estate and State Cadastral Valuation, Barnaul, Russian Federation

e-mail: zksenaya@gmail.com

Abstract. The article examines the incomplete and uneven incorporation of land reclamation projects for disturbed lands into the State Fund of Data Obtained as a Result of Land Management (SFLMD). Although the current legislation of the Russian Federation classifies such projects as land management documentation subject to mandatory submission to the SFLMD, this requirement is not consistently observed in practice. An analysis of official responses from the territorial offices of the Public Law Company "Roskadastr" in six constituent entities of the Russian Federation revealed substantial regional disparities. These ranged from the complete absence of land reclamation projects in certain municipal districts of Altai Krai to 873 projects registered in Kemerovo Oblast. Nevertheless, all regions examined exhibit intensive economic activities associated with land disturbance, including mineral extraction, agricultural production, and construction. This is corroborated by official licensing data and by satellite imagery analysis of the respective territories. The absence of land reclamation projects in the SFLMD undermines citizens' constitutional right to reliable information on the environmental condition of territories and impedes rational land-use planning. To address these deficiencies, the study proposes amending Government Decree of the Russian Federation No. 781 of May 29, 2025, "On Approval of the Rules for Land Reclamation and Conservation," by introducing a mechanism for the mandatory submission of land reclamation projects to Roskadastr. It is further recommended that administrative liability be established for the non-submission of such documentation and that interagency data exchange be ensured among Rosreestr, Rosprirodnadzor, and Rosselkhoznadzor. The findings contribute to the improvement of land resource governance and the enhancement of environmental safety across the territories of the Russian Federation.

Keywords: land reclamation, State Fund of Data Obtained as a Result of Land Management, land reclamation project, disturbed lands, Public Law Company "Roskadastr", land management documentation, interdepartmental coordination

For citation:
Kartashova K. P., Dubrovsky A. V., Kubrakov D. V., Tatarenko V. I. (2026). On the System of Regional Specially Protected Natural Areas of Russia. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 134–145. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-134-145

Введение

Использование достоверных и объективных данных о состоянии земель является основой системы территориального планирования и рационального использования земельных ресурсов [1, 2]. Помимо этого, объективная информация о земельных ресурсах в немалой степени характеризует экологическое и экономическое состояние регионов и страны в целом [3]. Важная роль в области информационного обеспечения состояния земельных ресурсов принадлежит землеустроительной документации. Особый интерес вызывают проекты рекультивации нарушенных земель, так как содержат информацию о них (включая качественные и количественные характеристики состояния земель, пространственные данные) [2, 4]. Также в них содержится информация о способах рекультивации

и их сроках, что позволяет использовать данные документы в целях планирования землепользования в долгосрочной перспективе.

Проекты рекультивации являются видом землеустроительной документации и подлежат включению в государственный фонд данных землеустройства (далее – Фонд, ГФДЗ) (О землеустройстве. Федеральный закон от 18.06.2001 № 78-ФЗ. Российская газета. 2001. 23 июня (№ 118)). В настоящее время выявлены проблемы, связанные с недостаточностью в Фонде сведений о рекультивации земель, несоответствием между формальным учетом сведений о проектах рекультивации и их фактической полнотой, достоверностью для принятия управленческих решений в сфере рационального использования земель и обеспечения экологической безопасности. Кроме того, существуют противоречия в законодательстве, регулирующем как ведение ГФДЗ, так и требования к рекультивации.

Большое внимание в научных исследованиях рационального землепользования уделяется вопросам, связанным с нарушенными землями и их рекультивацией, что говорит о высокой значимости этих задач [5]. Например, вопросы о рекультивации земель, нарушенных в результате проведения горных работ, и связанные с этим экономические аспекты рассмотрены в работе [6]. Авторы отмечают, что «по законодательству должны быть проведены работы по возвращению деградированных земель в пригодное, то есть вовлеченное в новый хозяйственный оборот состояние. Таким образом, ответственность добывающего предприятия выражается в экономической разности стоимости земельного участка до и после окончания добычных работ с учетом коэффициента доходности, который эту ценность определяет».

В стратегическом документе «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» (Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Президентом РФ 30.04.2012). Официальный сайт Президента России [Электронный ресурс]. URL: kremlin.ru (дата обращения: 05.09.2026)) подчеркивается приоритетность задачи «восстановления нарушенных естественных экологических систем». Авторами настоящей статьи проведено исследование проблемы недостаточности данных о проектах рекультивации, содержащихся в Фонде. Эти проблемы могут привести к неэффективному управлению земельными ресурсами, а также возникновению экологических рисков, в том числе угроз устойчивого развития территорий, социальной и экологической напряженности.

Целью статьи является статистический анализ наполнения государственного фонда данных землеустройства проектами рекультивации нарушенных земель, выявление причин недостаточного информационного обмена, а также разработка предложений по совершенствованию нормативно-правового регулирования и межведомственного взаимодействия для обеспечения полноты, достоверности и доступности этой землеустроительной документации.

Методы и материалы

При проведении исследования в работе применяются следующие научные материалы и методы: анализ нормативно-правовой базы РФ, метод системного и сравнительного анализа, исследование различных информационных ресурсов, таких как официальные сайты государственных органов и исполнительных органов субъектов РФ, электронный портал государственных услуг (https://www.gosuslugi.ru/), анализ данных дистанционного зондирования Земли.

В соответствии с действующим законодательством Российской Федерации рекультивация должна проводиться согласно разработанной проектной документации. Статья 19 федерального закона «О землеустройстве» (далее – Закон о землеустройстве) относит проект рекультивации нарушенных земель к землеустроительной документации. Проекты рекультивации, как и иная землеустроительная документация, подлежат включению в Фонд в соответствии со статьей 24 Закона о землеустройстве. Приказом Росреестра № П/0036 [Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и карто-

графии от 14.02.2023 № П/0036 «Об установлении порядка согласования и утверждения землеустроительной документации, порядка создания и ведения государственного фонда данных, полученных в результате проведения землеустройства, а также порядка их использования. Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303220007 (дата обращения: 05.09.2026)] утвержден специальный порядок относительно создания и ведения Фонда (далее – Порядок). Лица, которые осуществляют проведение землеустройства, обязаны бесплатно передавать экземпляр подготовленной ими землеустроительной документации в Фонд. Ведение Фонда, а также предоставление его документов и материалов осуществляет публично-правовая компания «Роскадастр» и ее филиалы. Также действующим российским законодательством установлено, что сведения, содержащиеся в ГФДЗ, являются открытыми и общедоступными (за исключением сведений ограниченного распространения, пункт 3 Приказа Росреестра № П/0036). Получение сведений из фонда данных возможно на основании соответствующего заявления посредством электронного портала государственных услуг (Госуслуги), а также через направление обращения посредством официального сайта или личного обращения в ППК Роскадастр и ее территориальные органы.

Результаты

В ходе проведенного исследования направлены запросы (заявления) в территориальные органы ППК «Роскадастр» на получение сведений из фонда данных о проектах рекультивации. Заявления направлены выборочно по нескольким регионам и муниципальным образованиям, на которых осуществлялась и осуществляется деятельность, связанная с нарушением земель, и где была проведена или запланирована к проведению рекультивация.

По результатам анализа сведений, полученных из Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Новосибирской области (отдел землеустройства, мониторинга земель, кадастровой оценки недвижимости, геодезии и картографии), установлено, что в фонде данных по Новосибирской области содержится всего 10 проектов рекультивации (годы создания: 1979, 2014, 2015, 2016, 2018).

Вместе с тем, в данном регионе производится добыча полезных ископаемых, сопряженная с нарушением земель и их рекультивацией. Например, в Искитимском районе Новосибирской области юридические лица осуществляют добычу антрацита открытым способом, и рекультивация является обязательным условием осуществления такой деятельности. Также в данном регионе осуществляется добыча россыпного золота и других полезных ископаемых, включая общераспространенные.

Согласно Перечню действующих лицензий на пользование участками недр местного значения на территории Новосибирской области по состоянию на 12.05.2025, размещенного на официальном сайте Министерства природных ресурсов и экологии Новосибирской области [Перечню действующих лицензий на пользование участками недр местного значения на территории Новосибирской области по состоянию на 12.05.2025 [Электронный ресурс]. URL: https://mpr.nso.ru/-page/3070?ysclid=mdr5v43jmq859047212 (дата обращения 05.09.2026)], на территории региона действует 111 лицензий с различным целевым назначением работ (геологическое изучение, разведка и добыча и т. д.).

В регионе находятся промышленные и сельскохозяйственные предприятия, деятельность которых также сопряжена с нарушением земель. Например, в 2022 г. юридическим лицом был причинен вред почвам в Новосибирском районе Новосибирской области в результате сброса отходов животноводства на рельеф местности и загрязнения почв (Постановление Седьмого арбитражного апелляционного суда от 31.05.2023 № 07АП-3563/2023 по делу № А45-26784/2022 [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»). Были нарушены земли кадастрового квартала 54:10:028210, а также земельные участки с кадастровыми номерами 54:10:028210:5116 и 54:10:028210:59. В отно-

шении нарушенной территории подготовлен проект рекультивации, размещен на сайте администрации Колыванского района Новосибирской области [Комплексный проект восстановления нарушенных земель и водного объекта р. Амба. Проектная документация, ООО «Проект», 2023. – 151 с.], однако информация о данном проекте рекультивации, как и о многих других, в ГФДЗ отсутствует.

В рамках данной статьи проанализирована информация ГФДЗ на наличие проектов рекультивации Томской, Омской, Кемеровской областей, Алтайского (Алтайский, Солонешенский и Чарышский районы) и Красноярского краев (Мотыгинский район).

В соответствии с Уведомлением об отказе в предоставлении документов или информации о документах государственного фонда данных филиала ППК «Роскадастр» по Алтайскому краю, сведения о таком виде землеустроительной документации, как проекты рекультивации, отсутствуют в ГФДЗ. Однако в упомянутых выше районах Алтайского края производятся работы, связанные с добычей золота, например, разведка и добыча россыпного золота на территории Алтайского района в бассейне реки Баранча (https://rosnedra.gov). На рис. 1 представлены космоснимки нарушенной золотодобытчиками территории в районе реки Баранча Алтайского района Алтайского края.

а) *б*)

Рис. 1. Космоснимок (ПО Google Earth Pro) нарушенной территории в районе реки Баранча:

а) космоснимок территории прииска Баранча от 22.09.2024 с контуром нарушенных земель, определенном методом визуального дешифрирования;

б) космоснимок территории реки Баранча от 09.09.2010 до организации золотодобычи

Рассмотренный пример является одним из свидетельств наличия нарушенных земель в Алтайском крае, в отношении которых требуется проведение рекультивации.

Согласно Уведомлению филиала ППК «Роскадастр» по Красноярскому краю, в государственном фонде данных, полученных в результате проведения землеустройства, отсутствует запрашиваемая землеустроительная документация. Вместе с тем в Мотыгинском районе Красноярского края в течение продолжительного периода развивается промышленное недропользование, в частности проводятся работы по геологическому изучению и добыче золота (россыпного, рудного), например, месторождения (и техногенные россыпи) в бассейнах рек Удерей, Большая Пенченга (рис. 2), Шаарган и др. Также известно Кокуйское угольное месторождение, первые разработки которого относят к 1994 г. [7].

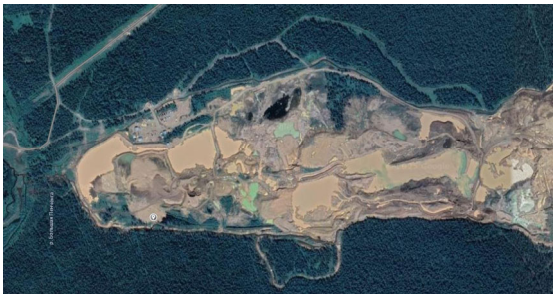


Рис. 2. Космоснимок (ПО Google Earth Pro) нарушенной территории в Красноярском крае

Решением от 06.08.2025 о предоставлении документов или информации о документах

государственного фонда данных филиала ППК «Роскадастр» по Омской области предоставлены данные о проектах рекультивации по Омской области, содержащиеся в ГФДЗ. Так, в фонде данных по Омской области содержится информация о 95 проектах рекультивации (в том числе поступивших в 2025 г.). Описанные в соответствующей справке проекты рекультивации преимущественно касаются земель, нарушенных в результате размещения или реконструкции линейных объектов (автомобильных дорог, водопроводов, газопроводов, подземных трубопроводов и т. п.).

В результате просмотра официального сайта Минприроды Омской области установлено наличие действующих лицензий, связанных с добычей полезных ископаемых (суглинки, строительные пески и др.), что соответственно приводит к нарушению земель [8]. Однако проекты рекультивации, касающиеся указанных лицензий в Омской области, отсутствуют в справке из Фонда.

В соответствии с решением от 01.08.2025 о предоставлении документов или информации о документах государственного фонда данных филиала ППК «Роскадастр» по Кемеровской области предоставлены данные о проектах рекультивации нарушенных земель по Кемеровской области – Кузбассу, содержащиеся в ГФДЗ. Согласно представленной справке в Фонде содержится информация о 873 проектах рекультивации земель, нарушенных в результате проведения горных работ и сопутствующего размещения отвалов вскрышных пород, строительства и реконструкции линейных объектов (линий электропередачи, автомобильных дорог, в том числе технологических), строительства очистных сооружений, снятия плодородного слоя почвы и др. Частично представленная справка содержит информацию о кадастровых номерах земельных участков, а также о площади, подлежащей рекультивации.

Имеющаяся в ГФДЗ Кемеровской области информация о проектах рекультивации позволяет получить достаточно подробное представление об использовании земель в регионе, а также сформировать при необходимости решения и стратегические документы по управлению земельным фондом.

Согласно ответу филиала ППК «Роскадастр» по Томской области от 27.08.2025, в Фонде содержится информация об одном документе, связанном с рекультивацией земель (Отчет о рекультивации земель 1998 г., имеющий статус «Открытый доступ»). Сводные данные по регионам, в которых в рамках данной работы была запрошена информация о наличии документации о проектах рекультивации в Фонде, представлены на рис. 3.

Рис. 3. Сведения о проектах рекультивации, содержащихся в ГФДЗ

По результатам проведенного анализа, сведения, содержащиеся в ГФДЗ по проектам рекультивации, количественно и качественно значительно различаются по регионам.

В целом, можно сделать вывод о низких количественных показателях по направлению лицами проектов рекультивации как вида землеустроительной документации, в указанных выше регионах, за исключением Кемеровской области – Кузбасса, где показатели предоставления проектов рекультивации в Фонд достаточно высоки. Лица, обязанные предоставлять в Фонд проекты рекультивации нарушенных земель, игнорируют положения Закона о землеустройстве и порядка. Данная проблема не учтена в полной мере соответствующими органами власти, имеются законодательные пробелы, отсутствует достоверный учет данного вида землеустроительной документации.

Вместе с тем данный вид документации представляет собой источник пространственных данных о нарушенных и рекультивированных землях, о возможностях использования территории в будущем и экологической обстановке территории.

Отсутствие информации о проектах рекультивации в фонде данных может нарушать права неопределенного круга лиц, ведь согласно Конституции РФ (ст. 42) каждый гражданин имеет право на достоверную информацию о состоянии окружающей среды. В отсутствие полной информации об объекте землеустройства, о том, что происходило на этих землях, какова ее экономическая ценность, экологические риски, невозможно в полной мере безопасно и рационально использовать земли.

Проект рекультивации должен быть разработан, когда только планируются работы, связанные с нарушением земель, или непосредственно, когда эти земли уже нарушены, например, по выданному предписанию контрольно-надзорного органа. Соответственно, отсутствие в ГФДЗ информации о проектах рекультивации подразумевает отсутствие актуальной и достоверной информации о нарушенных землях. Это также влияет на экономическую (инвестиционную) составляющую и в отношении прилегающих к объектам землеустройства земель.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 29.05.2025 № 781 утверждены новые Правила проведения рекультивации и консервации земель (далее – Правила рекультивации) (Постановление Правительства Российской Федерации от 29.05.2025 № 781 «Об утверждении Правил проведения рекультивации и консервации земель». Собрание законодательства Российской Федерации. – 2025. – № 22 (часть I), ст. 2898) Согласно Правилам рекультивации, проекты подлежат согласованию с собственниками, арендаторами, землепользователями или органами государственной власти и местного самоуправления, уполномоченными на предоставление земельных участков. После получения согласования (а в отдельных случаях и получения положительного заключения экологической экспертизы) проекты рекультивации утверждаются и направляются в Россельхознадзор (в отношении земель сельхозназначения, оборот которых регулируется федеральным законом «Об обороте земель сельскохозяйственного назначения» (Об обороте земель сельскохозяйственного назначения. Федеральный закон от 24.07.2002 № 101-ФЗ. Собрание законодательства РФ. 2002. № 30. Ст. 3018) и Росприроднадзор (в отношении земель иных категорий).

Следует предусмотреть взаимосвязь между Правилами рекультивации и Законом о землеустройстве. В качестве решения может быть рассмотрен вопрос о внесении изменений (дополнений) в Правила № 781, а именно предлагается дополнить пункт 30 Правил № 781 подпунктом «в» следующего содержания: «Публично-правовую компанию «Роскадастр» Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии, в целях формирования достоверного государственного фонда данных, полученных в результате землеустройства (в соответствии со ст. 24 Закона о землеустройстве)». Таким образом, лицо, обеспечивающее рекультивацию земель, будет обязано направить согласованный и утвержденный проект рекультивации в «Роскадастр».

Также в качестве информационных, технологических и законодательных инициатив по обеспечению требования передачи проекта рекультивации в «Роскадастр и его реализации предлагается:

– предусмотреть профилактические мероприятия, направленные на повышение добросовестности лиц, осуществляющих землеустроительные работы. Например, проведение информирования лиц, осуществляющих землеустроительные работы, посредством размещения необходимой информации на официальных сайтах Росреестра и его территориальных органов, Роскадастра и его территориальных учреждений, а также при проведении соответствующих профилактических визитов надзорными ведомствами;

– предусмотреть инструменты административного характера, такие как, например, необходимость получения выписки из ГФДЗ о наличии конкретного проекта рекультивации как обязательного документа при прекращении права пользования недрами (Роснедра, ОИВ субъекта) или получении разрешения на ввод объекта в эксплуатацию, или снятия объекта с учета как объекта негативного воздействия на окружающую среду (Росприроднадзор);

– повысить уровень межведомственного взаимодействия (между Росреестром, Росприроднадзором, Россельхознадзором), включая регламентированный обмен информацией о проектах рекультивации, с целью достоверного учета этого вида документации, а также нарушенных и рекультивированных землях;

– централизованно собрать информацию о наличии проектов рекультивации в ГФДЗ по субъектам Российской Федерации и провести соответствующую комплексную аналитику с выявлением проблемных регионов, и напротив, регионов с высокими показателями наличия данной документации в Фонде.

Для сведений по проектам рекультивации, направляемых в Роскадастр, необходимо регламентное установление векторного формата предоставления данных о границах нарушенных и рекультивируемых земель. Это позволит осуществлять необходимый пространственный анализ сведений с учетом границ административно-территориального деления, кадастровых границ, зон с особыми условиями использования территорий и т. д. [9]. Вместе с тем представляется целесообразным дополнить публичную кадастровую карту Национальной системы пространственных данных сведениями о нарушенных и рекультивируемых землях в соответствии с проектами рекультивации, представленными в Фонд.

Таким образом, обязанность направления проектов рекультивации в Фонд будет закреплена и в Правилах рекультивации, которыми руководствуются все лица, деятельность которых связана с нарушением земель. Это повысит количество поступающей в ГФДЗ документации и, соответственно, обеспеченность заинтересованного круга лиц информацией о нарушенных, рекультивируемых и восстановленных землях. В свою очередь, полнота информации Фонда позволит качественно планировать и организовывать рациональное использование земель.

Обсуждение

В работе [10] подчеркивается эколого-социальная эффективность рекультивации нарушенных земель, делается акцент на том, что «необходимо разрабатывать местную стратегию рекультивации с учетом экологических, экономических и социальных аспектов. Необходимо участие местного населения в процессе принятия решений о первоочередных объектах рекультивации». Также выполненные ранее исследования других авторов подтверждают необходимость на законодательном уровне «вменить в обязанность контролирующим органам надзор за ходом восстановительных работ», подчеркивают, что «хозяйственная и экологическая эффективность рекультивации должна отвечать нормативно-правовым актам и определяться не количеством рекультивированных земель, а уровнем восстановленности свойств техногенных ландшафтов исходным ненарушенным почвам (стабильным и динамическим почвенноэкологическим функциям)» [11]. Такого эффекта возможно добиться только при наделении публично-правовой компании «Роскадастр» полномочиями по контролю за внесением сведений о проектах рекультивации в ГФДЗ.

Важность землеустроительной документации и проектов по рекультивации, необходимость их использования при решении вопросов, связанных с управлением земельными ресурсами и планированием развития территорий на примере Вологодской области, отражена в работе [12]. Кроме того, как подчеркнуто в работе [13], ГФДЗ и проекты рекультивации являются необходимым и официальным источником информации и документов для проведения работ по планировке территории и др. Ряд данных, приведенных в работе [14], демонстрирует, что только 20 % из земель, нарушенных угольной промышленностью, полностью рекультивируется. Также в качестве приоритетной задачи отмечается «определение рационального направления рекультивации и целевого использования рекультивируемых земель в будущем».

Таким образом, анализ приведенных исследований показывает, что существующие подходы к оценке рекультивации преимущественно носят либо общетеоретический, либо узкоотраслевой характер, при этом комплексные критерии, учитывающие одновременно

экологическое состояние почв, экономическую целесообразность и социальные ожидания населения, до настоящего времени остаются недостаточно разработанными применительно к конкретным регионам [15]. Наряду с контрольными функциями «Роскадастра» требуется интеграция данных о ходе рекультивации с автоматизированной системой мониторинга, что повышает прозрачность процесса и оперативность принятия решений по управлению территориями. Представленные в статье результаты согласуются с выводами ведущих специалистов в данной области, развивают их в направлении создания практико-ориентированного инструментария, что подтверждает прикладную значимость выполненного исследования.

Заключение

В результате проведенного исследования сформированы следующие выводы.

1. Государственный фонд данных, полученных в результате землеустройства, является достоверным официальным источником информации и документов, необходимых для рационального использования земель и устойчивого использования территорий. Проекты рекультивации нарушенных земель должны быть полноценным компонентом ГФДЗ с регламентированным и упорядоченным предоставлением, в том числе сведениями о границах нарушенных и восстановленных земель в векторном формате.

2. Учитывая отсутствие полной актуальной и объективной информации о проектах рекультивации в ГФДЗ различных субъектов РФ, а также игнорирование лицами, обязанными предоставлять землеустроительную документацию в Фонд, положений законодательства, необходимо установление административной и дисциплинарной ответственности за непредставление в Фонд проектов рекультивации.

3. Внести соответствующие поправки в пункт 30 Правил рекультивации, которые будут обязывать лиц, обеспечивающих рекультивацию земель, направлять согласованный и утвержденный проект рекультивации в «Роскадастр».

4. Выполнить интеграцию данных из ГФДЗ в сервисы НСПД и ЕГРН. Вместе с этим требуется повышение уровня межведомственного взаимодействия органов Росреестра, Росприроднадзора и Россельхознадзора.

Вопросы рекультивации нарушенных земель неразрывно связаны с экономикой и экологическим состоянием соответствующих территорий. Объективный и достоверный учет такого вида землеустроительной документации, как проекты рекультивации в Фонде данных, является необходимым условием успешного и устойчивого планирования и использования земельных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Добровольский Д. О., Портнов А. М. Концепция централизованной системы планирования реализации государственного земельного надзора и мониторинга земель. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 3. С. 157–167. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-157-167.

2. Карташова К. П., Дубровский А. В., Москвин В. Н. О применении индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного геологического контроля. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 4. С. 145–155. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-145-155.

3. Федорчук А. С., Дубровский А. В. Методическое обеспечение расчета инвестиционной привлекательности проектов по освоению земельных ресурсов на примере территории города Новосибирска. Вестник СГУГиТ. 2026. Т. 31, № 4. С. 149–160. DOI https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-149-160.

4. Трубина Л. К., Лисакова О. А., Ступин В. П. Совершенствование информационного обеспечения экодиагностики урбанизированных территорий. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 5. С. 178–187. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-178-187.

5. Нгендаменья Э., Сизов А. П. Рекультивация нарушенных земель при отработке месторождений полезных ископаемых: вызовы и решения, мировой опыт. Вестник СГУГиТ. 2026. Т. 231, № 3. С. 176–183. DOI 10.33764/2411-1759-2026-31-3-176-183.

6. Чмыхалова С. В., Гришин В. Ю., Пыталев И. А. Рекультивация нарушенных горным производством земель с учетом особенностей отвода земель под предприятия горной промышленности. Безопасность труда в промышленности. 2023. № 4. С. 28–33. DOI 10.24000/0409-2961-2023-4-28-33.

7. Демидов Ю. В. Особенности разработки Кокуйского месторождения каменных углей. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 8. С. 196–197. EDN MVCJOB.

8. Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Перечни участков недр [Электронный ресурс]. URL: https://mpr.omskportal.ru/oiv/mpr/otrasl/nedry-i-voda/perechen?ysclid=mjque5ce8a360459496.

9. Дубовик Д. С., Баранова Е. И. Роль факторов региональной и локальной физико-географической дифференциации при оценке хозяйственного использования территорий Внутренней Азии. Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 3. С. 259–266.

10. Суслова Э. Ю. Эколого-социальная эффективность рекультивации нарушенных земель на примере Калужской области. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. № 9-1(108). С. 147–151. DOI 10.24412/2500-1000-2025-9-1-147-151.

11. Ларина О. Г., Томаков В. И., Томаков М. В. Правовые проблемы реализации проектов рекультивации нарушенных земель при строительстве магистральных трубопроводов. Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. История и право. 2019. Т. 9, № 2(31). С. 40–52.

12. Авдеев Ю. М., Тесаловский А. А. Ведение государственного фонда полученных в результате проведения землеустройства данных в Вологодской области. NovaUm.Ru. 2018. № 15. С. 72–74.

13. Ушкуронец Л. М., Зайцева Н. В. Роль государственного фонда данных, полученных в результате проведения землеустройства, при проведении землеустроительных работ в Новосибирской области. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. С. 212–216. EDN SBORXV.

14. Харионовский А. А., Данилова М. Ю. Рекультивация нарушенных земель в угольной промышленности. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 3. С. 72–77.

15. Огудов А. С., Креймер М. А., Баранова Е. И. Комплексная оценка экологически неблагополучных территорий в постиндустриальной фазе развития горнопромышленных районов. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс, 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 3: Международная научная конференция «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью». Новосибирск : СГУГиТ, 2025. С. 276–283. DOI 10.33764/2618-981X-2025-3-276-283.

REFERENCES

1. Dobrovolsky, D. O., & Portnov, A. M. (2024). Concept of a centralized planning system for the implementation of state land supervision and land monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 29(3), 157–167. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-157-167 [in Russian].

2. Kartashova, K. P., Dubrovsky, A. V., & Moskvin, V. N. (2024). On the application of risk indicators of violation of mandatory requirements in the implementation of federal state geological control. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 29(4), 145–155. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-145-155 [in Russian].

3. Fedorchuk, A. S., & Dubrovsky, A. V. (2026). Methodological support for calculating the investment attractiveness of land development projects on the example of the territory of the city of Novosibirsk. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 31(4), 149–160. DOI 10.33764/2411-1759-2026-31-4-149-160 [in Russian].

4. Trubina, L. K., Lisakova, O. A., & Stupin, V. P. (2024). Improvement of information support for ecodiagnostics of urbanized territories. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 29(5), 178–187. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-178-187 [in Russian].

5. Ngendamena, E., & Sizov, A. P. (2026). Reclamation of disturbed lands during mining: challenges and solutions, world experience. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 31(3), 176–183. DOI 10.33764/2411-1759-2026-31-3-176-183 [in Russian].

5. Chmykhalova, S. V., Grishin, V. Yu., & Pytalev, I. A. (2023). Reclamation of lands disturbed by mining with regard to the specifics of land allotment for mining enterprises. *Bezopasnost truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry],* (4), 28–33. DOI 10.24000/0409-2961-2023-4-28-33 [in Russian].

7. Demidov, Yu. V. (2001). Features of the development of the Kokuyskoye coal deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin],* (8), 196–197. EDN MVCJOB [in Russian].

8. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Omsk Region. (n.d.). Lists of subsurface plots. Retrieved from https://mpr.omskportal.ru/oiv/mpr/otrasl/nedry-i-voda/perechen?ysclid=mjque5ce8a360-459496 [in Russian].

9. Dubovik, D. S., & Baranova, E. I. (2018). The role of factors of regional and local physical-geographical differentiation in assessing the economic use of territories of Inner Asia. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 23(3), 259–266 [in Russian].

10. Suslova, E. Yu. (2025). Ecological and social efficiency of disturbed land reclamation on the example of the Kaluga region. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International Journal of Humanities and Natural Sciences],* (9-1(108)), 147–151. DOI 10.24412/2500-1000-2025-9-1-147-151 [in Russian].

11. Larina, O. G., Tomakov, V. I., & Tomakov, M. V. (2019). Legal problems of implementing disturbed land reclamation projects during the construction of main pipelines. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya i pravo [Proceedings of the Southwest State University. Series: History and Law],* 9(2(31)), 40–52 [in Russian].

12. Avdeev, Yu. M., & Tesalovsky, A. A. (2018). *Vedenie gosudarstvennogo fonda poluchennykh v rezultate provedeniya zemleustroistva dannykh v Vologodskoi oblasti [Maintenance of the state fund of data obtained as a result of land management in the Vologda region].* NovaUm.Ru, (15), 72–74 [in Russian].

13. Ushkuronenets, L. M., & Zaitseva, N. V. (2014). The role of the state fund of data obtained as a result of land management in carrying out land management works in the Novosibirsk region. *Interekspo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia],* 3(2), 212–216. EDN SBORXV [in Russian].

14. Kharionovsky, A. A., & Danilova, M. Yu. (2017). Reclamation of disturbed lands in the coal industry. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti [Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry],* (3), 72–77 [in Russian].

15. Ogudov, A. S., Kreimer, M. A., & Baranova, E. I. (2025). Comprehensive assessment of environmentally disadvantaged territories in the post-industrial phase of development of mining regions. *Interekspo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia],* 3, 276–283. DOI 10.33764/2618-981X-2025-3-276-283 [in Russian].

Об авторах

Ксения Петровна Карташова – заместитель начальника управления по методической работе Управления систематизации и анализа показателей использования земель сельскохозяйственного назначения.

Алексей Викторович Дубровский – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и природопользования.

Дмитрий Валерьевич Кубраков – начальник отдела государственной кадастровой оценки.

Валерий Иванович Татаренко – доктор экономических наук, профессор кафедры экологии природопользования и техносферной безопасности.

Author details

Ksenia P. Kartashova – Deputy Head of the Methodological Work Division, Department for Systematization and Analysis of Agricultural Land Use Indicators.

Alexey V. Dubrovsky – DSc, Professor, Dean of the Faculty of Cadastre and Nature Management.

Dmitry V. Kubrakov – Head of the State Cadastral Valuation Department.

Valery I. Tatarenko – DSc, Professor, Department of Ecology, Nature Management and Technosphere Safety.

Получено / Received 09.09.2026
Поступила после рецензирования / Revised 09.10.2026
Принята к публикации / Accepted 14.10.2026

Научно-практическая статья/Research article
УДК 332.6:004.9
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-146-157

Разработка модели корректировки кадастровой стоимости объектов недвижимости повышенной комфортности (на примере пентхаусов г. Москвы)

И. Н. Кустышева[1]✉, *А. В. Никулина*[1]

[1] Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

e-mail: kustyshevain@tyuiu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с государственной кадастровой оценкой объектов недвижимости, при этом кадастровая стоимость не всегда сопоставима с рыночной. Это особенно очевидно в отношении квартир с уникальными характеристиками, расположенных в жилых комплексах повышенной комфортности. Действующая методика государственной кадастровой оценки не выделяет помещения элитного назначения в отдельную подгруппу, ввиду чего не учитывается ряд ценообразующих факторов, оказывающих значительное влияние на стоимость. Анализируются текущие процедуры оценки, их недостатки и специфика применения к элитным объектам недвижимости. Авторами предлагается ряд изменений и дополнений в существующую методику, направленных на более адекватное отражение рынка недвижимости данного сегмента; на основе практического опыта разработаны предложения по внесению изменений в расчет определения кадастровой стоимости помещений элитного назначения. По результатам исследования авторами сформулировано определение для такого понятия, как «пентхаус», которое отсутствует в нормативно-правовой документации, а также выведена корректировка на тип помещения (пентхаус/квартира), которая позволит повысить точность определения кадастровой стоимости объектов недвижимости повышенной комфортности в условиях меняющегося рынка.

Ключевые слова: государственная кадастровая оценка, жилье повышенной комфортности, кадастровая стоимость, пентхаус, ценообразующие факторы, объекты недвижимости, корректировка

Для цитирования:
Кустышева И. Н., Никулина А. В. Разработка модели корректировки кадастровой стоимости объектов недвижимости повышенной комфортности (на примере пентхаусов г. Москвы). *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 146–157. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-146-157

Refining cadastral valuation models for luxury residential assets: a case study on Moscow penthouses

I. N. Kustysheva[1]✉, *A. V. Nikulina*[1]

[1] Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

e-mail: kustyshevain@tyuiu.ru

Abstract. The persistent divergence between cadastral and market valuations represents a systemic challenge in real estate administration, undermining fiscal equity and urban planning efficiency. This

© И. Н. Кустышева, А. В. Никулина, 2026

disparity is particularly acute regarding unique residential units (penthouses) located within premium housing developments, where standard mass appraisal techniques fail to capture asset-specific value drivers. The core methodological deficiency lies in the current state cadastral valuation framework: it fails to stratify elite-purpose premises into distinct sub-groups during the grouping process. Consequently, significant price-forming factors are systematically excluded from the calculation base. While existing assessment procedures aim for broad coverage, they exhibit inherent limitations when applied to heterogeneous luxury assets, often resulting in substantial economic distortions. The study addresses this lacuna by proposing targeted amendments to the prevailing methodology based on empirical analysis. The authors propose a number of adjustments for determining the cadastral value of elite premises that account for their micro-segmentation. Furthermore, recognizing the regulatory ambiguity surrounding property typology, the research formulates a definition for the term "penthouse" that currently is absent in the regulatory documentation and derives a functional correction coefficient for premise type (penthouse versus standard apartment). Implementing these refinements will enhance the granularity and predictive accuracy of cadastral valuations for high-end properties, ensuring greater resilience against volatile market dynamics.

Keywords: state cadastral valuation, high-comfort housing, cadastral value, penthouse, price-determining factors, real estate properties, adjustment

For citation:
Kustysheva I. N., Nikulina A. V. (2026). Refining cadastral valuation models for luxury residential assets: a case study on Moscow penthouses. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 146–157. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-146-157

Введение

Любой объект недвижимости обладает ценностью, выраженной в виде стоимости. Наиболее распространенными видами стоимости недвижимого имущества являются рыночная и кадастровая, которые определяются в ходе индивидуальной и массовой оценки. Кадастровая стоимость, как правило, используется для целей налогообложения, и ее несоответствие реальной рыночной стоимости может привести к финансовым потерям со стороны как государства, так и собственников недвижимого имущества.

Стоимость объекта недвижимости, определенная в рамках процедуры государственной кадастровой оценки, не всегда сопоставима с рыночной стоимостью, что особенно заметно в отношении помещений с уникальными характеристиками (например, пентхаусов, двухуровневых квартир), расположенных в жилых комплексах повышенной комфортности.

В целях защиты интересов субъектов рынка недвижимости в настоящее время законодательством предусмотрена возможность установления в качестве кадастровой стоимости объекта недвижимости рыночной стоимости на дату установления кадастровой стоимости, о чем свидетельствует статья 22.1 федерального закона (О государственной кадастровой оценке : федеральный закон от 03.07.2016 № 237-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru. – Текст : электронный). Однако предусмотренная законодательством возможность позволяет устранить лишь точечные несоответствия, тогда как для комплексного решения проблемы важно выявить причины расхождений кадастровой и рыночной стоимости, разработать предложения и внести соответствующие изменения.

Основываясь на данных отчета № 1/2023 «Об итогах государственной кадастровой оценки зданий, помещений, сооружений, объектов незавершенного строительства, машино-мест, расположенных на территории города Москвы, по состоянию на 01.01.2023» (далее – Отчет о кадастровой оценке), можно отметить, что здания элитного назначения выделены в отдельную подгруппу [1]. Учет такого ценообразующего фактора как класс жилого комплекса позволяет повысить точность определения стоимости для типовых квартир, расположенных в жилых комплексах повышенной комфортности.

На примере типовых квартир без отделки в жилых комплексах повышенной комфортности можно отметить, что разница между удельным показателем кадастровой стоимости и средним удельным показателем рыночной стоимости составляет около 8 %, что говорит о небольшой погрешности определения кадастровой стоимости (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение рыночной и кадастровой стоимости на примере типовых квартир в жилых комплексах повышенной комфортности города Москвы

Название ЖК	Средняя рыночная стоимость, руб./кв. м*	Средняя кадастровая стоимость, руб./кв. м	Разница, %
JAZZ	416 800	388 091	7,4
Prime Park	607 869	511 336	18,9
«Огни»	397 965	395 414	0,6
«Небо»	449 776	395 696	13,7
West Garden	488 427	458 375	6,6
Onyx Deluxe	413 420	401 058	3,1
«Крылья»	382 924	367 351	4,2
–	–	–	7,8

Примечание. * – приведена к состоянию на дату определения кадастровой стоимости (01.01.2023), получена путем введения корректировок на дату (на основании индекса потребительских цен – 19,83 %) и торг (на основании Отчета о кадастровой оценке – 5,5 %) [1, 2].

Однако в рамках существующей методики определения кадастровой стоимости в городе Москве в отдельную подгруппу не выделены помещения элитного назначения, которые зачастую обладают уникальными характеристиками. На примере таких помещений – пентхаусов – можно отметить, что расхождение между рыночной и кадастровой стоимостью значительно выше, чем у типовых квартир, и в среднем составляет почти 78 %, что говорит о необходимости доработки методики определения кадастровой стоимости в отношении таких объектов (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение рыночной и кадастровой стоимости на примере пентхаусов в жилых комплексах повышенной комфортности города Москвы

Название ЖК	Средняя рыночная стоимость, руб./кв. м*	Средняя кадастровая стоимость, руб./кв. м	Разница, %
West Garden	678 381	458 375	48,0
«Власьевская Слобода»	698 613	432 867	61,4
«Еропкинский 16»	1 580 665	798 634	97,9
«Квартал на набережной NOW»	531 316	263 822	101,4
«Клубный дом на Смоленском бульваре»	1 031 362	573 411	79,9
«Прайм Парк»	860 969	487 985	76,4
–	–	–	77,5

Примечание. * – приведена к состоянию на дату определения кадастровой стоимости (01.01.2023), получена путем введения корректировок на дату (на основании индекса потребительских цен – 19,83 %) и торг (на основании Отчета о кадастровой оценке – 5,5 %) [1, 2].

Определение кадастровой стоимости жилых помещений в городе Москве в 2023 г. осуществлялось на основании удельного показателя кадастровой стоимости здания, в котором расположено помещение. При этом формулой предусмотрена только одна корректировка – на этаж расположения. Поскольку помещения элитного назначения не выделены в отдельную подгруппу, то в формуле определения кадастровой стоимости не учитываются уникальные характеристики, присущие объектам недвижимости повышенной комфортности, что снижает точность оценки.

В целях разрешения проблемы предлагается внести изменения в методику кадастровой оценки, что подразумевает выделение объектов элитного назначения в отдельную подгруппу. Кроме того, рекомендуется дополнить формулу расчета кадастровой стоимости корректировками на ценообразующие

факторы, присущие объектам недвижимости повышенной комфортности.

Рассматривая существующие научные исследования по тематике выведения корректировок на ценообразующие факторы, следует отметить, что наиболее комплексное исследование в данном направлении проведено Л. А. Лейфером. Результаты исследования представлены в виде ряда практических пособий.

В практическом пособии «Справочник оценщика недвижимости – 2022. Жилая недвижимость. Квартиры» под редакцией Л. А. Лейфера выведены корректировки на большинство основных ценообразующих факторов [3]. Корректировки выведены на основании экспертных исследований и статистического анализа с применением данных по вторичному рынку. При этом в процессе формирования перечня параметров сравнения не учитываются особенности локальных рынков. Так, например, рынок квартир в домах повышенной комфортности Москвы имеет свои отличительные особенности. В частности, для данного сегмента рынка характерно наличие пентхаусов, отличающихся от типовых квартир по ряду факторов. В Справочнике оценщика под редакцией Л. А. Лейфера не учтено влияние типа помещения (пентхаус/квартира) на стоимость объекта недвижимости.

Целью исследования является разработка корректирующего коэффициента, учитывающего тип помещения (пентхаус/квартира). Он предназначен для совершенствования оценочных моделей с целью сокращения расхождений между рыночной и кадастровой стоимостью для объектов недвижимости повышенной комфортности Москвы.

Методы и материалы

Материалы для исследования включают в себя нормативно-правовой анализ положений Федерального закона «О государственной кадастровой оценке» от 03.07.2016 № 237-ФЗ и Приказа Росреестра от 04.08.2021 № П/0336 «Об утверждении Методических указаний о государственной кадастровой оценке» (ГКО). Целью анализа было выявление правовых оснований и методических ограничений для выделения объектов повышенной комфортности в отдельную группу при расчете кадастровой стоимости. Ключевым выводом на данном этапе стало установление факта, что действующие нормативно-правовые акты, регламентирующие ГКО (в частности, раздел VII Методических указаний о методах массовой оценки), не предусматривают специальных корректировок для уникальных характеристик объектов недвижимости, что формирует правовую проблему, решаемую в исследовании. Также были использованы данные из таких информационных источников, как торговая площадка с объявлениями о продаже объектов недвижимости Cian.ru, Федеральная служба государственной статистики (Росстат), сервис для анализа рынка новостроек – «Пульс Продаж Новостроек». Данные о существующей методике государственной кадастровой оценки: Отчет № 1/2023 «Об итогах государственной кадастровой оценки зданий, помещений, сооружений, объектов незавершенного строительства, машино-мест, расположенных на территории города Москвы, по состоянию на 01.01.2023».

В ходе исследования использованы общие и специальные методы: аналитический, системный анализ, статистический анализ, наблюдение, измерение и сравнение. На основании представленных методов предлагается внести изменения в существующую методику государственной кадастровой оценки. Для этой цели будет проведен анализ существующего процесса определения кадастровой стоимости, а также выведена корректировка на тип помещения (пентхаус/квартира).

Ключевым этапом данного исследования является выведение и обоснование корректировки. Выделяют несколько методов выведения корректировок: метод парных продаж, экспертный, статистический и метод общей группировки. Наиболее распространенным является метод парных продаж, подразумевающий под собой сравнение двух идентичных объектов, отличающихся только по одному признаку, которым и объясняется разница в цене [4–6]. Статус «пентхаус» не является обособленной характеристикой, а включает в себя ряд привлекательных ценообразующих факторов. Поиск полностью идентичных объ-

ектов, отличающихся только характеристикой «пентхаус», затруднителен, ввиду чего в качестве метода выведения корректировки выступает модернизированный метод парных продаж, подразумевающий сравнение средних цен квартир и пентхаусов в рамках одного жилого комплекса.

Рассматривая общепринятую практику, следует отметить, что для выведения корректировок чаще всего анализируют данные сделок и предложений по вторичному рынку, что, например, можно заметить в широко используемом в оценочных кругах Справочнике оценщика недвижимости под авторством Л. А. Лейфера [3]. В рамках данного исследования предлагается иной подход: проводить анализ зависимости стоимости от ценообразующих факторов на основании первичного рынка, а именно предложений по продаже объектов недвижимости от застройщиков.

Такой подход обусловлен тем, что застройщики уделяют особое внимание ценообразованию по ряду причин: отчетность перед банковскими структурами, получение максимального дохода, недопущение «вымываемости» отдельных типов лотов [7]. Компания-застройщик может проводить ценообразование самостоятельно при наличии отдела аналитики либо посредством обращения в консалтинговые компании. У каждого застройщика ценовая политика различна, но исходя из указанных факторов чаще всего приближена к рыночным тенденциям, что позволяет использовать такие данные в целях расчета корректировок для ценообразующих факторов.

В настоящее время существует ряд сервисов, предоставляющих агрегированную информацию по предложениям от застройщиков, один из которых – «Пульс Продаж Новостроек». В ходе исследования была использована информация, предоставленная данным сервисом [8].

Результаты

В качестве первичного результата исследования следует рассматривать систематизацию выводов нормативно-правового анализа. Изучение федерального закона № 237-ФЗ и методических указаний Росреестра позволило выявить ключевое противоречие:

– законодательство допускает установление кадастровой стоимости, равной рыночной (ст. 22.1 ФЗ-237), однако это является точечным механизмом, не устраняющим системную проблему;

– действующая методика ГКО, основанная на принципах массовой оценки (п. VII методических указаний), не предусматривает выделения помещений элитного назначения (пентхаусов) в отдельную подгруппу в рамках классификаторов, таких как приложение № 2 к методическим указаниям.

В ходе исследования был проведен анализ влияния на итоговую стоимость такого ценообразующего фактора, как тип помещения (пентхаус/квартира). На данный момент законодательно отсутствует определение понятия «Пентхаус». Были проанализированы определения, которые упоминаются в статьях научных авторов и на их основании сформулировано наиболее полное определение.

Пентхаус – квартира, расположенная на последнем (последних) этаже (этажах) многоквартирного дома, правообладателю которого принадлежит часть эксплуатируемой кровли, используемой с определенными ограничениями [9, 10].

Помимо возможности эксплуатации кровли пентхаусы могут обладать рядом привлекательных параметров: большая площадь помещения, высокий этаж расположения, панорамные виды, высокие потолки, собственная терраса, панорамное остекление, может быть предусмотрен отдельный лифт [11, 12]. Наличие представленных преимуществ позволяет сделать предположение, что пентхаусы стоят дороже типовых квартир.

Для подтверждения или опровержения гипотезы были рассмотрены предложения по продаже квартир на первичном рынке на основании данных сервиса «Пульс Продаж Новостроек» [8]. Отобраны жилые комплексы повышенной комфортности, в которых среди предложений имеются пентхаусы. Были рассмотрены средние цены на квартиры и на пентхаусы в рамках одного жилого комплекса. При наличии нескольких очередей строительства расчет был произведен для каждой очереди отдельно. Для каждого ценового сегмента (квартиры и пентхаусы в пределах одного жилого комплекса) была выполнена процедура очистки данных от выбросов (объектов с экстремально низкими или высокими значениями цены). Идентификация выбросов про-

водилась статистическим методом Box Plot с использованием встроенного инструментария Microsoft Excel. Для получения более достоверного результата из расчета исключены жилые комплексы, в которых представлено только одно предложение по продаже пентхаусов. Результаты выведения корректировки показаны в табл. 3 и на графике рисунка.

Таблица 3. Результаты выведения корректировки на тип помещения (пентхаус/квартира)

Название ЖК	Очередь	Пентхаус		Квартира		Разница цены пентхауса к цене квартиры, %
		Средняя цена за 1 кв. м	Кол-во предложений	Средняя цена за 1 кв. м	Кол-во предложений	
Ilove	I кв. 2024	676 000	2	493 000	48	37,1
INJOY	I кв. 2027	532 000	7	473 000	796	12,5
Level «Мичуринский»	II кв. 2025	894 000	5	737 000	45	21,3
West Garden	II кв. 2023	921 000	12	776 000	98	18,7
«Остров (Москва)»	I кв. 2028	1 076 000	2	763 000	80	41,0
Prime Park	II кв. 2025	1 256 000	3	869 000	18	44,5
Prime Park	III кв. 2026	1 313 000	2	760 000	43	72,8
Victory Park Residence	Весь ЖК	2 629 000	5	1 819 000	28	44,5
«Достижение»	Весь ЖК	853 000	7	701 000	50	21,7
«РЕКА»	Весь ЖК	1 113 000	3	897 000	21	24,1
«Татарская 35»	Весь ЖК	2 502 000	2	1 722 000	163	45,3
«Фрунзенская набережная»	Весь ЖК	4 602 000	4	2 907 000	76	58,3
«Чистые пруды»	Весь ЖК	3 954 000	4	2 479 000	6	59,5
–	–	–	–	–	–	38,6

Результаты выведения корректировки на тип помещения (пентхаус/квартира)

На основании анализа предложений по продаже квартир на первичном рынке можно сделать вывод, что пентхаусы стоят дороже типовых квартир в среднем на 38,6 %.

Для анализа достоверности выведенной корректировки дополнительно был применен метод экспертных оценок. Так, согласно выводам аналитика S. A. Ricci, цена одного квадратного метра пентхауса на 30–50 % выше, чем квартиры, расположенной в том же жилом комплексе, а по данным Циан.Журнала такая разница составляет в среднем 40 % [13, 14]. Выведенная корректировка сопоставима с экспертным мнением, что подтверждает достоверность расчета.

Корректировку на тип помещения предлагается добавить в формулу определения кадастровой стоимости помещений

$$КС = УПКС \times S \times К_{эт} \times К_{тип}, \qquad (1)$$

где КС – кадастровая стоимость объектов оценки;

УПКС – удельный показатель кадастровой стоимости здания, в котором

расположено помещение;

S – площадь объекта оценки;

$К_{эт}$ – корректировка на этаж помещения (понижающая корректировка, которая применяется в отношении помещений, расположенных на первом этаже);

$К_{тип}$ – корректировка на тип помещения (пентхаус/квартира).

Значения корректировки для фактора «Тип помещения» представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения для корректировки «Тип помещения»

Тип помещения	Корректировка
Пентхаус	1,386
Квартира	1

На основании модернизированной формулы – с добавлением корректировки на тип помещения (квартира/пентхаус) – была пересчитана кадастровая стоимость. Результаты вычислений и сопоставление рыночной и кадастровой стоимости представлены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнение рыночной и кадастровой стоимости после пересчета на примере пентхаусов в жилых комплексах повышенной комфортности города Москвы

Название ЖК	Средняя рыночная стоимость, руб./кв. м*	Средняя кадастровая стоимость, руб./кв. м	Разница, %
West Garden	678 381	635 307	6,8
«Власьевская Слобода»	698 613	599 954	16,4
«Еропкинский 16»	1 580 665	1 106 906	42,8
«Квартал на набережной NOW»	531 316	365 658	45,3
«Клубный дом на Смоленском бульваре»	1 031 362	794 748	29,8
«Прайм Парк»	860 969	676 347	27,3
–	–	–	28,1

Примечание. * – приведена к состоянию на дату определения кадастровой стоимости (01.01.2023), получена путем введения корректировок на дату (на основании индекса потребительских цен – 19,83 %) и торг (на основании Отчета о кадастровой оценке – 5,5 %) [1, 2]

В результате пересчета кадастровой стоимости средняя разница составила 28 %, что почти в 3 раза ниже, чем до введения корректировки на тип помещения, исходя из чего можно сделать вывод, что учет такого фактора, как тип помещения, позволил добиться более точного результата определения кадастровой стоимости.

Одновременно с этим следует отметить, что разница между рыночной и кадастровой стоимостью после введения корректировки по-прежнему остается существенной, что говорит о необходимости внесения дополнительных изменений в формулу определения кадастровой стоимости помещений элитного назначения.

Обсуждение

Государственная кадастровая оценка представляет собой сложный и многоэтапный процесс. Внесение изменений в методику расчета кадастровой стоимости требует комплексного подхода, включающего в себя не только разработку и внедрение новых методик, но и нормативно-правовое обеспечение.

Учет такого ценообразующего фактора, как тип помещения (пентхаус/квартира), предполагает ряд предварительных действий: законодательно закрепить понятие «пентхаус», идентифицировать пентхаусы и внести сведения о таких помещениях в Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН). Вопросом, требующим более детального анализа, является процесс идентификации пентхаусов и дальнейшее внесение сведений о типе помещения в ЕГРН. Важно определить четкие критерии, по которым помещение может быть отнесено к пентхаусам. В качестве источников информации могут быть использованы объявления о продаже таких типов помещений, а также сайты застройщиков.

Корректировка на тип помещения (пентхаус/квартира) выведена только для жилья повышенной комфортности, ввиду чего для типового жилья такая корректировка будет неактуальна. В связи с этим необходимо выделить помещения элитного назначения в отдельную подгруппу.

В работе авторами представлена модернизированная формула расчета кадастровой стоимости помещений элитного назначения, которая позволила сократить разницу между

рыночной и кадастровой стоимостью. Тем не менее существующая разница остается значительной, что свидетельствует о необходимости учета иных дополнительных ценообразующих факторов. Рассматривая существующую практику кадастровой оценки в Москве в 2023 г., следует отметить, что формула по определению кадастровой стоимости помещений содержит малое количество корректировок, недостаточное для точного определения кадастровой стоимости. Так, например, в отношении помещений элитного назначения не учитывается фактор расположения квартиры на двух этажах (двухуровневые квартиры).

Одновременно с этим не учитывается влияние таких базовых характеристик, как площадь и этаж расположения. Например, рассматривая фактор этажа расположения, можно выделить, что существующая формула определения кадастровой стоимости содержит только понижающую корректировку для помещений, расположенных на первом этаже. При этом две аналогичные квартиры, расположенные на 3-м и 45-м этажах, будут иметь одинаковую кадастровую стоимость, тогда как на рынке недвижимости стоимость квартиры, как правило, возрастает при увеличении этажа. В отношении фактора площади на рынке недвижимости наблюдается похожая закономерность: согласно приложению 12 приказа Росреестра (Об утверждении методических указаний о государственной кадастровой оценке : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 04.08.2021 № П/0336. – URL: http://www.consultant.ru. – Текст : электронный) в типовом жилье цена за квадратный метр уменьшается при увеличении площади, тогда как для жилья повышенной комфортности цена за квадратный метр, напротив, увеличивается при повышении площади [15]. Несмотря на существующую рыночную тенденцию, фактор зависимости стоимости от площади также не учтен при определении кадастровой стоимости помещений в Москве.

При этом выведенная корректировка частично дублирует влияние других ценообразующих факторов, ввиду чего в дальнейших исследованиях планируется вывести ряд корректировок на иные характеристики объекта недвижимости (например, этаж и площадь). Это позволит привести цены квартир и пентхаусов к единообразию (например, к единому этажу и площади) и получить более достоверную величину поправочного коэффициента на тип помещения (пентхаус/квартира).

Приведение цен к единообразию позволит внедрить в предложенную модель другие корректировки, не дублируя их влияние. Одновременно с этим, такой подход позволит в дальнейшем расширить выборку для расчета корректировки на тип помещения (пентхаус/квартира) благодаря возможности исключения ряда влияющих факторов посредством приведения цен.

Следует отметить, что на данный момент не учтен вес исследуемого фактора – тип помещения (пентхаус/квартира). При формировании комплексного решения с совокупностью поправочных коэффициентов будет проведен более глубокий анализ влияния каждого из факторов на итоговую величину стоимости.

Таким образом, для повышения точности определения кадастровой стоимости требуется разработать ряд дополнительных корректировок и сформировать комплексное решение, направленное на внесение изменений в методику определения кадастровой стоимости жилых объектов повышенной комфортности.

Сопоставляя полученные результаты с результатами других авторов, можно сделать ряд выводов. Так, например, в Справочнике оценщика под редакцией Л. А. Лейфера выведены только основные корректировки, не учитывающие особенности локального рынка [3]. В рамках данного исследования выведена корректировка на тип помещения (квартира/пентхаус), характерная для конкретного сегмента рынка – объектов недвижимости повышенной комфортности Москвы. Отличается и методология выведения корректирующих значений – были использованы данные по первичному рынку в единообразной форме от сервиса «Пульс Продаж Новостроек», тогда как в работе Л. А. Лейфера используются данные по вторичному рынку, которые зачастую не структурированы [3, 8]. Общим явля-

ется использование экспертного подхода как дополнительного для подтверждения выведенной корректировки.

Таким образом, в сравнении с научным трудом Л. А. Лейфера, в ходе исследования была использована похожая, но измененная методология выведения корректировок, основанная на использовании более структурированных данных – по первичному рынку, – а также выполнен акцент на конкретном сегменте рынка – объектах недвижимости повышенной комфортности в Москве.

Заключение

Стоимость является неотъемлемой составляющей любого объекта недвижимости. В настоящее время существуют рыночная и кадастровая стоимость, для целей расчета которых применяют методы индивидуальной и массовой оценки. Кадастровая стоимость является базой налогообложения, ввиду чего ее несоответствие реальной рыночной стоимости может затрагивать права участников рынка недвижимости.

На стоимость объекта недвижимости влияет совокупность ценообразующих факторов. Жилье повышенной комфортности обладает рядом уникальных характеристик. Однако не всегда кадастровая стоимость таких объектов приближена к рыночной. Действующим законодательством предусмотрена возможность установления рыночной стоимости в качестве кадастровой, однако такая мера является точечной. Для решения проблемы необходимо выявить причины несоответствия и внести необходимые изменения.

Существующая методика государственной кадастровой оценки выделяет в отдельную подгруппу здания элитного назначения, но не выделяет помещения элитного назначения. Для корректного расчета их кадастровой стоимости важно учитывать влияние ценообразующих факторов, присущих таких помещениям. Формула определения кадастровой стоимости помещений включает только одну корректировку – на этаж расположения. Ввиду этого кадастровая стоимость типовой квартиры в жилых комплексах повышенной комфортности близка к рыночной, тогда как кадастровая стоимость квартир с уникальными характеристиками, например, пентхаусов, значительно ниже рыночной.

В ходе исследования был рассмотрен один из ценообразующих факторов жилья повышенной комфортности – тип недвижимости (пентхаус/квартира). Пентхаусы обладают рядом привлекательных характеристик, вследствие чего цена за квадратный метр на них выше, чем на типовые квартиры. С помощью модернизированного метода парных продаж и экспертного метода была выведена корректировка на тип помещения и предложено внесение изменений в формулу определения кадастровой стоимости жилых помещений. На примере пентхаусов в Москве был выполнен пересчет кадастровой стоимости, в результате разницу между рыночной и кадастровой стоимостью удалось сократить почти втрое.

Эффективность разработанной модели доказана путем сравнения с существующими аналогами – рыночными ценами. После введения корректировки на тип помещения разница между рыночной и кадастровой стоимости пентхаусов сократилась с 77,5 до 28,1 %. Повышение точности было достигнуто благодаря дополнению формулы расчета кадастровой стоимости помещений корректировкой на тип помещения (квартира/пентхаус), которая ранее не учитывалась в кадастровой оценке.

Выведение корректировки на тип помещения (пентхаус/квартира) является начальным этапом формирования комплексного решения по внесению изменений в методические указания по государственной кадастровой оценки и, в частности, по внесению изменений в процесс определения кадастровой стоимости помещений элитного назначения в Москве. Такое комплексное решение позволит повысить точность определения кадастровой стоимости и приблизить к рыночной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об итогах государственной кадастровой оценки зданий, помещений, сооружений, объектов незавершенного строительства, машино-мест, расположенных на территории города Москвы, по

состоянию на 01.01.2023 : Отчет № 1/2023 Государственное бюджетное учреждение города Москвы «Городской центр имущественных платежей». Т. 1-5. М., 2023.

2. Индексы потребительских цен на товары и услуги по Российской Федерации в 1991–2025. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/price (дата обращения: 15.07.2025).

3. Лейфер Л. А., Афанасьева Т. В., Уханов П. Е., Нестерова Д. В., Шмыкова К. А. Справочник оценщика недвижимости 2022. Жилая недвижимость. Квартиры : практ. пособие. Нижний Новгород : Приволжский центр финансового консалтинга и оценки, 2022. 297 с.

4. Ковалева А. М., Дворядкин К. С. Методы расчета корректировок в сравнительном подходе к оценке земельных участков. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 4-1. С. 112–115.

5. Мельничук А. Ю., Антоненко Е. В. Расчет локальных поправочных коэффициентов кадастровой стоимости для земельных участков, граничащих с автомобильными дорогами, методом парных продаж (на примере Республики Крым). Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 6. С. 160–168. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-160-168.

6. Соколова Т. А., Москвин В. Н. Корректирование результатов государственной кадастровой оценки земель населенных пунктов. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 4. С. 193–204. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-193-204.

7. Усатова М. С. Совершенствование ценообразования на рынке первичного многоквартирного жилищного строительства. Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Национальная конференция с международным участием, посвященная 300-летию Российской академии наук, Белгород, 18–20 мая 2022 г. Том 5. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. С. 189–193. EDN UUPFKQ.

8. Пульс Продаж Новостроек [Электронный ресурс]. URL: https://pulsprodaj.ru/ (дата обращения: 15.07.2025).

9. Зиятдинов З. З., Михалчева С. Г. Динамика морфологии жилья крупного города в 2000–2022. Архитектон: известия вузов. 2023. № 1(81). DOI 10.47055/19904126_2023_1(81)_3. EDN DBBSYN.

10. Иванушкина В. С., Осколкова С. А. К вопросу о разграничении понятий «апартаменты» и «пентхаус». Инновационное развитие современной науки : сборник научных трудов по материалам XXXIV Международной научно-практической конференции, Анапа, 10 апреля 2021 г. Анапа: Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов в Южном Федеральном округе, 2021. С. 33–36. EDN AOEUEH.

11. Бабошко В. И. Выявление современных планировочных особенностей квартир в «элитных» жилых комплексах на примере пентхаусов (Гонконг). Научный альманах. 2019. № 4-2 (54). С. 20–23. EDN WVJTPB.

12. Захаров А. В. Устройство пентхаусов в Высотных зданиях the device of penthouses in High-rise buildings. Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых : сборник материалов научно-практических конференций, Владимир, 06–12 марта 2018 г. Владимир : Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2018. С. 816–825. EDN ZBJJKH.

13. S. A. Ricci. Жилая недвижимость. Покупка пентхауса обойдется вполовину дороже квартиры. HomeHunter [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://homehunter.ru/news/pokupka-penthausa-obojdetsya-vpolovinu-dorozhe-kvartiry (дата обращения: 15.07.2025).

14. Лагутов А. Пентхаусы: мифы и реальность // Циан.Журнал [Электронный ресурс] 2024. URL: https://www.cian.ru/stati-penthausy-mify-i-realnost-335567/ (дата обращения: 15.07.2025).

15. Пушкарев Г. А., Овчинников Я. А., Андерс Е. Д. Математическое моделирование как способ верификации ценностных соответствий на рынке жилья. Московский экономический журнал. 2025. №. 6. С. 67–83. DOI 10.55186/2413046X_2025_10_6_155.

REFERENCES

1. Report No. 1/2023 On the results of the state cadastral valuation of buildings, premises, structures, unfinished construction projects, parking spaces located on the territory of the city of Moscow, as of 01.01.2023 / *State Budgetary Institution of the City of Moscow "City Center for Property Payments".* Moscow, 2023. Vol. 1-5 [in Russian].

2. Consumer Price Indices for Goods and Services in the Russian Federation in 1991-2025. Federal State Statistics Service 2025. Retrieved from https://rosstat.gov.ru/statistics/price (Accessed: 15.07.2025) [in Russian].

3. Leifer L. A., Afanasyeva T. V., Ukhanov P. E., Nesterova D. V., Shmykova K. A. (2022). *Spravochnik otsenshchika nedvizhimosti 2022. Zhilaya nedvizhimost'. Kvartiry: prakt. posobiye. [Real Estate Appraiser's Handbook – 2022. Residential Real Estate. Apartments: Practical Guide]* Nizhny Novgorod: Privolzhsky Center for Financial Consulting and Appraisal, 297 p/ [in Russian].

4. Kovaleva A. M., Dvoryadkin K. S. (2015). Methods of calculating adjustments in a comparative approach to land assessment. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. [International Journal of Applied and Fundamental Research].* No. 4-1. P. 112–115 [in Russian].

5. Melnichuk A. Yu., Antonenko E. V. (2022). Calculation of local correction factors of cadastral value for land plots bordering motorways using the paired sales method (using the Republic of Crimea as an example). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* Vol. 27, No. 6. P. 160–168. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-160-168 [in Russian].

6. Sokolova T. A., Moskvin V. N. (2020). Adjustment of the results of state cadastral valuation of lands of populated areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* Vol. 25, No. 4. pp. 193–204. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-193-204 [in Russian].

7. Usatova, M. S. (2022). Improving pricing in the primary multi-apartment housing construction market. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova : Natsional'naya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennaya 300-letiyu Rossiyskoy akademii nauk, Belgorod, 18–20 maya 2022 goda. Tom 5. – Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet im. V.G. Shukhova, [International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov: National conference with international participation, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Belgorod, May 18-20, 2022. Vol. 5. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov].* Pp. 189–193. EDN UUPFKQ [in Russian].

8. Pulse of New Building Sales Retrieved from https://pulsprodaj.ru/ (date of access: 15.07.2025) [in Russian].

9. Ziyatdinov, Z. Z., Mikhalcheva S. G. (2023). Dynamics of Housing Morphology in a Large City in 2000-2022. *Arkhitekton: izvestiya vuzov [Architecton: News of Universities].* No. 1(81). DOI 10.47055/19904126_2023_1(81)_3. EDN DBBSYN [in Russian].

10. Ivanushkina, V. S., Oskolkova S. A. (2021). On the Distinction between the Concepts of "Apartments" and "Penthouse". *Innovatsionnoye razvitiye sovremennoy nauki : sbornik nauchnykh trudov po materialam XXXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Anapa, 10 aprelya 2021 goda. Anapa: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Nauchno-issledovatel'skiy tsentr ekonomicheskikh i sotsial'nykh protsessov» v Yuzhnom Federal'nom okruge [Innovative Development of Modern Science: Collection of Scientific Papers Based on the Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference, Anapa, April 10, 2021. Anapa: Limited Liability Company "Research Center for Economic and Social Processes" in the Southern Federal District].* Pp. 33–36. EDN AOEUEH [in Russian].

11. Baboshko, V. I. (2019). Identification of modern layout features of apartments in "elite" residential complexes using penthouses as an example (Hong Kong). *Nauchnyy al'manakh [Scientific almanac].* No. 4-2(54). Pp. 20–23. EDN WVJTPB [in Russian].

12. Zakharov, A. V. (2018). The device of penthouses in high-rise buildings. *Dni nauki studentov Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Aleksandra Grigor'yevicha i Nikolaya Grigor'yevicha Stoletovykh : Sbornik materialov nauchno-prakticheskikh konferentsiy, Vladimir, 12 marta – 06 2018 goda. Vladimir: Vladimirskiy gosudarstvennyy universitet im. Aleksandra Grigor'yevicha i Nikolaya Grigor'yevicha Stoletovykh, [Science Days of Students of Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov: Collection of materials from scientific and practical conferences, Vladimir, March 12–06, 2018. – Vladimir: Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolay Grigorievich Stoletov],* Pp. 816–825. EDN ZBJJKH [in Russian].

13. S.A. Ricci residential real estate Buying a penthouse will cost half as much as an apartment. HomeHunter 2018. Retrieved from https://homehunter.ru/news/pokupka-penthausa-obojdetsya-vpolovinu-dorozhe-kvartiry (Accessed: 15.07.2025) [in Russian].

14. Lagutov A. Penthouses: Myths and Reality. Cian.Journal 2024. Retrieved from https://www.cian.ru/stati-penthausy-mify-i-realnost-335567/ (date of access: 15.07.2025) [in Russian].

15. Pushkarev G. A., Ovchinnikov Ya. A., Anders E. D. (2025). Mathematical modeling as a method for verifying value correspondences in the housing market. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal. [Moscow Economic Journal].* No. 6. pp. 67-83. DOI: https://doi.org/10.55186/2413046X_2025_10_6_155 [in Russian].

Об авторах

Ирина Николаевна Кустышева – кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Анна Владимировна Никулина – магистрант кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Author details

Irina N. Kustysheva – PhD, Associate Professor, Department of Geodesy and Cadastral Activity.

Anna V. Nikulina – Master Student, Department of Geodesy and Cadastral Activity.

Получено / Received 12.09.2025
Поступила после рецензирования / Revised 12.01.2026
Принята к публикации / Accepted 09.09.2026

Научно-поисковая статья /Research article
УДК 528.44:004.9
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-158-168

Разработка рекомендаций по внедрению кадастровой информационной модели

А. А. Панютищева[1]✉, *Г. Г. Шевченко*[1]

[1] Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

e-mail: 21pan.a@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка рекомендаций по формированию кадастровой информационной модели (КИМ) – цифровой платформы, объединяющей структурированное описание данных об объектах недвижимости, их характеристиках, правах, ограничениях и связанных процессах. В условиях значительного роста интереса к совершенствованию кадастровой системы Российской Федерации КИМ выступает ключевым инструментом цифровой трансформации, обеспечивая интеграцию графической, текстовой, геопространственной и правовой информации. Разработаны требования к КИМ: группировка данных по характеристикам, актуализация, интеграция с ФГИС ЕГРН, архивность и безопасность. Структура включает геопространственные данные, реквизиты объектов, права, оценки, историю изменений и сервисы обмена. Для верификации предложены семь сценариев применения: уточнение границ земельных участков, инвентаризация зданий, мониторинг деформаций, квартальная инвентаризация, формирование ЦМР, обновление ЕГРН по жалобам и классификация для налогообложения. Разработана градация пяти уровней детализации, от базового 2D-учета до цифрового двойника, обеспечивающая поэтапное внедрение в зависимости от задач. Результаты исследования обосновывают поэтапный переход к 3D-кадастру, минимизируя ошибки, ускоряя процедуры и создавая единое информационное пространство для ЕГРН, ФНС и ГИСОГД. КИМ способствует цифровизации кадастровой сферы, повышая точность и оперативность государственного управления недвижимостью.

Ключевые слова: кадастровая информационная модель, цифровая трансформация, уровни детализации, автоматизация кадастрового учета, цифровой двойник, межевание территории, уточнение границ, техническая инвентаризация

Для цитирования:
Панютищева А. А., Шевченко Г. Г. Разработка рекомендаций по внедрению кадастровой информационной модели. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 158–168. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-158-168

Developing recommendations for the implementation of a cadastral information model

A. A. Panyutischeva[1]✉, *G. G. Shevchenko*[1]

[1] Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

e-mail: 21pan.a@mail.ru

© А. А. Панютищева, Г. Г. Шевченко, 2026

Abstract. The article presents a framework for the development of a cadastral information model (CIM) – a digital platform designed to consolidate structured data on real estate objects, encompassing their physical characteristics, legal rights, restrictions, and associated administrative processes. In the context of ongoing efforts to modernize the cadastral system of the Russian Federation, the CIM is positioned as a foundational instrument for digital transformation, facilitating the integration of graphical, textual, geospatial, and legal information into a unified environment. A comprehensive set of requirements for the CIM was formulated, addressing data classification by attribute, mechanisms for data updating, interoperability with the Federal State Information System of the Unified State Register of Real Estate (USRRE), archival functionality, and information security protocols. The proposed architectural structure incorporates geospatial datasets, object metadata, rights and encumbrance records, valuation information, temporal change histories, and standardized data exchange services. To validate the model, seven representative application scenarios were defined: land parcel boundary refinement, building stock inventory, structural deformation monitoring, periodic cadastral inventory, digital terrain model generation, USRRE updates triggered by public appeals, and land classification for property taxation. A five-level hierarchy of model detail was introduced, progressing from basic 2D cadastral accounting to a digital twin, thereby supporting phased implementation aligned with institutional priorities and technical readiness. The findings provide a methodological basis for the incremental transition to a 3D cadastre, offering measurable improvements in data accuracy, procedural efficiency, and interagency coordination among the USRRE, the Federal Tax Service, and the State Information System for Urban Planning Activities. The CIM framework represents a strategic contribution to the digitalization of cadastral administration and the enhancement of state governance in real estate management.

Keywords: cadastral information model, digital transformation, levels of detail, automation of cadastral registration, digital twin, land surveying, boundary refinement, technical inventory

For citation:
Panyutischeva A. A., Shevchenko G. G. (2026). Developing recommendations for the implementation of a cadastral information model. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 158–168. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-158-168

Введение

В последние годы в России наблюдается значительный рост интереса к развитию и совершенствованию кадастровой системы, что обусловлено необходимостью повышения эффективности государственного управления недвижимостью и земельными ресурсами. Однако в настоящий момент отсутствуют нормативные документы, регулирующие процесс создания трехмерных информационных объектов недвижимости для целей кадастрового учета, а также отсутствуют требования к предоставлению информации в трехмерном виде. Это связано с тем, что кадастр ведется в двумерной плоскости, в которой учитывается только плановое положение объектов. Однако с учетом появления все более сложных и нестандартных объектов недвижимости такой подход становится недостаточным и возникает необходимость ведения их учета в трехмерном формате для повышения точности и полноты кадастровых данных.

Разработке информационных моделей, являющихся важным направлением совершенствования кадастровой деятельности и направленных на повышение качества, достоверности и полноты учета объектов недвижимости, посвящены работы В. В. Талапова [1, 2], Е. И. Аврунева [3], Д. В. Лисицкого [4, 5], А. В. Чернова [6, 7] и Д. А. Гуры [8, 9]. В данных работах рассматривается формирование информационной модели для повышения достоверности кадастровой информации, акцентируется внимание на проблемах унификации и проверки данных, на особенностях создания информационных моделей объектов недвижимости, включая структурирование и визуализацию данных через разработку и применение информационных моделей. Во

многих работах авторы выделяют важность системной интеграции разных видов кадастровой информации и автоматизации процессов обновления данных, что уменьшает количество ошибок и повышает оперативность учета [10]. При этом мало внимания уделено вопросам процессного управления кадастровой информацией и адаптации моделей к требованиям цифровой трансформации.

В этом контексте становится актуальной задача создания кадастровой информационной модели. Под КИМ будем понимать целостную цифровую модель, представляющую формализованное и структурированное описание данных об объектах недвижимости, их характеристиках, географическом расположении, правах и ограничениях, а также связанных процессах и документах. КИМ объектов недвижимости должна обладать уровнем детализации, необходимым для точности кадастрового учета, уточнения границ, мониторинга изменений и интеграции в ФГИС ЕГРН. Такая интеграция способствует решению задач государственного кадастрового учета, кадастровой оценки, а также управления земельными и имущественными ресурсами [11].

Информационное наполнение КИМ должно включать геометрические данные (координаты поворотных точек границ земельного участка, трехмерные параметры объектов недвижимости, схемы расположения), атрибутивные данные (кадастровые номера, площади, назначение, права собственности) и документы (межевые планы, технические планы, выписки ЕГРН), обеспечивая реализацию сценариев применения технологий информационного моделирования [12, 13].

Технология разработки КИМ должна будет основываться на системном и структурированном подходе к организации кадастровых данных. Кадастровые работы рассматриваются как совокупность производственных процессов, реализуемых в рамках установленного нормативно-правового поля. Одной из ключевых задач КИМ должно являться управление большими объемами различных данных, которые зачастую распределены и дублируются в различных документах, справочниках и информационных системах.

Следует учитывать, что для формирования качественной КИМ необходимо получение пространственных данных об объектах недвижимости, которое можно обеспечить с помощью различных видов лазерного сканирования – наземного, воздушного и мобильного. [14, 15]. Использование как стационарных наземных сканеров, так и мобильных решений типа Go–SLAM позволяет обеспечить высокоточную и детализированную трехмерную модель объектов, отражающую геометрическую и пространственую структуру объектов недвижимости с достаточной точностью необходимой для кадастровых задач [16, 17].

Далее рассмотрим процесс формирования такой кадастровой информационной модели.

Методы и материалы

Для формирования КИМ необходимо применение современных информационных и геоинформационных технологий, обеспечивающих управление земельными ресурсами на различных территориальных уровнях. Использование таких технологий позволит повысить качество и оперативность ведения государственного кадастрового учета [18].

Для успешной разработки и применения КИМ должны будут соблюдаться следующие разработанные требования:

– данные должны быть сгруппированы по атрибутивным характеристикам и взаимосвязям между ними. При этом они должны содержать информацию об изменениях характеристик и юридического статуса объектов;

– модель должна содержать полный объем информации, необходимый для задач кадастрового учета, оценки и управления территориями, а также своевременно обновляться для поддержания актуальности данных;

– возможна интеграция с другими государственными информационными системами, геоинформационными сервисами и внешними реестрами;

– должна обеспечиваться архивность данных, позволяющих получать и восстанав-

ливать информацию за определенный период времени;

– должны соблюдаться требования по обеспечению конфиденциальности, целостности и доступности данных [19].

Структура наполнения КИМ основывается:

– на геопространственных данных, включающих координаты, границы, площади и пространственные взаимосвязи объектов;

– реквизитах объектов недвижимости: кадастровом номере, типе, назначении, адресе, категории земель и технических характеристиках;

– правовых характеристиках, содержащих сведения о формах собственности, ограничениях, обременениях, зарегистрированных правах и сделках;

– оценочных показателях: кадастровой стоимости, факторов ценообразования, результатах массовых и индивидуальных оценок;

– документах и истории изменений: данных о декларациях, выписках, актах согласования и графиках изменения статусов;

– информации об участниках и процессах: о правообладателях, заявителях, органах учета и этапах кадастровых процедур;

– интеграционных сервисах, модулях для обмена данными с геоинформационными системами, государственными и муниципальными органами;

– механизмах формирования отчетности и аналитики, обеспечивающих мониторинг состояния земельного фонда и рынка недвижимости.

Для верификации предложенной структуры КИМ на практике разработаны конкретные сценарии ее применения, демонстрирующие реализацию модулей на реальных задачах кадастровых работ. Данные сценарии базируются на результатах лазерного сканирования и ориентированы на ключевые процедуры государственного кадастрового учета, что обеспечивает плавный переход к детальному описанию внедрения.

Результаты

В рамках разработки рекомендаций по получению пространственных данных об объектах недвижимости предложены семь сценариев внедрения КИМ (С1–С7), обеспечивающих выполнение ключевых кадастровых работ. Каждый сценарий ориентирован на практические задачи кадастровых инженеров, оценщиков, органов местного самоуправления и Росреестра, включая уточнение границ, инвентаризацию объектов капитального строительства (ОКС), мониторинг состояния конструкций, массовый учет кварталов, техническое межевание, обновление данных по жалобам и автоматизированную классификацию для целей налогообложения.

Сценарий С1 «Уточнение границ земельных участков с ОКС для межевого плана на основе данных LiDAR». Использование КИМ земельного участка для автоматизированного уточнения границ и формирования межевого плана. Облако точек формата LAS с плотностью не менее 100 тчк/м² и геопривязкой GNSS–RTK обеспечивает автоматизированное выявление поворотных точек границ, межевых знаков и ограждений, расчет площади и периметра с сохранением результатов в КИМ участка. Результаты уточнения границ должны передаваться в ЕГРН в формате IFC/XML с визуализацией наложений.

Сценарий С2 «Инвентаризация жилых зданий для технического плана ОКС на основе данных LiDAR». Использование КИМ жилого здания для инвентаризации и формирования технического плана ОКС. Элементы КИМ жилого здания с информационным наполнением (интенсивность отражений, RGB-текстуры) обеспечивают сегментацию фасадов, кровель и пристроек, расчет технико-экономических показателей (ТЭП) и классификацию материалов с сохранением атрибутов в семантической модели.

Сценарий С3 «Мониторинг состояния конструкций жилых объектов на основе данных LiDAR». Использование КИМ жилого здания для мониторинга состояния конструкций и контроля изменений в ЕГРН. 3D-облака точек обеспечивают выявление смещений и трещин с хронологической фиксацией в КИМ жилого здания и формированием карт деформаций для составления технических планов, оценки технического состояния

объектов недвижимости оценщиками, планирования реконструкций и капитального ремонта, а также контроля соответствия проектной документации.

Сценарий С4 «Масштабная инвентаризация квартала малоэтажной застройки на основе данных LiDAR». Использование КИМ квартала для масштабной инвентаризации и генерации цифровой модели рельефа (ЦМР). Классифицированные облака точек обеспечивают интерполяцию ЦМР (TIN/GRID) и создание цифровой модели местности (ЦММ) с атрибутированным реестром объектов для комплексных кадастровых работ, уточнения границ земельных участков и объектов капитального строительства в границах одного или нескольких кадастровых кварталов, образования новых земельных участков под зданиями и сооружениями, а также последующего внесения точных сведений в ЕГРН.

Сценарий С5 «Формирование ЦМР участка для межевания на основе данных LiDAR». Использование КИМ участка для формирования ЦМР и межевания земельных участков. Фильтрованные облака точек обеспечивают интерполяцию TIN, наложение границ ОКС и расчет уклонов с сохранением результатов в КИМ участка.

Сценарий С6 «Обновление данных ЕГРН по жалобам на основе данных LiDAR». Использование КИМ жилого здания для автоматизированного обновления сведений ЕГРН по жалобам. Локальное облако точек с геопривязкой GNSS-RTK обеспечивает сравнение фактических границ и ОКС с учетными координатами ЕГРН, выявление расхождений и сегментацию спорных объектов (пристройки, смещения ограждений) с формированием XML-протокола. Результаты обновления должны передаваться в Росреестр в формате XML/IFC.

Сценарий С7 «Автоматизированная классификация жилых объектов для целей налогообложения на основе данных LiDAR». Использование КИМ жилого здания для автоматизированной классификации объектов и расчета налоговой базы. Классифицированные облака точек с атрибутами интенсивности отражений и многоканальными данными обеспечивают сегментацию объектов, определение типологии (жилые дома, пристройки, гаражи), этажности, материалов фасадов и расчет налоговой базы по кадастровой стоимости с экспортом атрибутированных данных.

Систематизация разработанных сценариев представлена в табл. 1, 2, которые детализируют цели применения каждого сценария в соответствии с нормативными требованиями.

Таблица 1. Перечень наименования сценариев и целей их применения для внедрения КИМ

Сценарий	Наименование сценария внедрения КИМ	Цели сценария внедрения КИМ	Практическое применение для целей кадастра
С1	Уточнение границ земельных участков с жилыми ОКС для межевого плана	Автоматизированное определение поворотных точек границ земельного участка для межевого плана	Постановка на кадастровый учет, уточнение местоположения границ земельных участков, формирование межевого плана
С2	Инвентаризация жилых зданий для технического плана ОКС на основе	Создание 3D-модели ОКС для учета в ЕГРН	Техническая инвентаризация ОКС, подготовка технического плана для государственной регистрации ОКС
С3	Мониторинг деформаций конструкций жилых объектов	Контроль смещений для кадастрового надзора	Контроль изменений характеристик объектов недвижимости, актуализация сведений ЕГРН о техническом состоянии ОКС
С4	Масштабная инвентаризация квартала малоэтажной застройки	Комплексный 3D-кадастр жилого массива	Выполнение комплексных кадастровых работ, уточнение границ земельных участков и ОКС

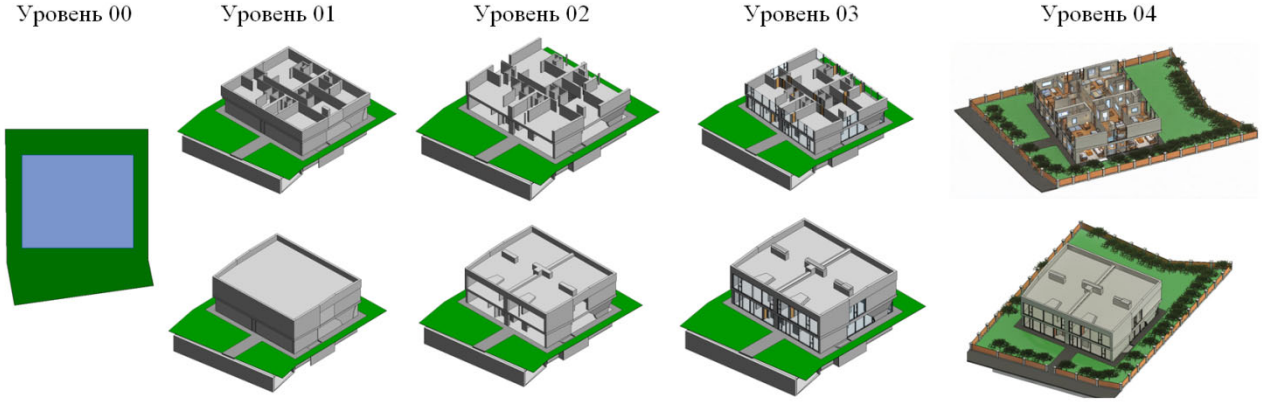
Окончание табл. 1

Сценарий	Наименование сценария внедрения КИМ	Цели сценария внедрения КИМ	Практическое применение для целей кадастра
С5	Формирование ЦМР участка с рельефом для межевания	Интеграция рельефа в межевой план жилого объекта	Создание ЦМР для межевания земельных участков, расчет объемов земляных работ, формирование приложений к межевым планам
С6	Обновление данных ЕГРН по жалобам	Корректировка сведений без уведомления соседей	Исправление технических ошибок в сведениях ЕГРН, актуализация данных по результатам жалоб граждан, формирование актов уточнения границ
С7	Автоматизированная классификация жилых объектов для целей налогообложения	Формирование налоговой базы по кадастровой стоимости	Формирование атрибутированных реестров объектов для расчета кадастровой стоимости, передача данных в ФНС для автоматизированного начисления налогов

Для обеспечения логической преемственности между практическим применением КИМ в кадастровых работах и представлением КИМ в трехмерном виде в табл. 2 предложена классификация из пяти уровней детализации данных, прототипом которых стали уровни детализации LOD, применяемые при создании BIM-моделей согласно ПНСТ 909–2024 (ПНСТ 909–2024. Требования к цифровым информационным моделям объектов непроизводственного назначения. Часть 1. Жилые здания: предв. нац. стандарт Рос. Федерации / Росстандарт от 01.02.2024. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1304635174. – Текст: электронный). Данная классификация позволяет структурировать требования к содержанию и степени детализации моделей в зависимости от целей их использования и сценариев С1–С7 (табл. 3), обеспечивая поэтапное развитие от традиционного 2D-учета к полноценным цифровым двойникам территорий (рисунок).

Таблица 2. Классификация уровней детализации КИМ

Уровень	Описание	Характеристика	Применение
Уровень 00	Базовый уровень	Плоская модель без пространственных данных, содержит атрибутивные сведения (кадастровый номер, площадь, адрес)	Традиционный учет без трехмерных данных
Уровень 01	Начальный уровень	Двухмерная модель с привязкой к координатам, границы земельных участков, контуры зданий, основные характеристики	Простые пространственные запросы, стандартная отчетность
Уровень 02	Средний уровень	Трехмерная модель с детализацией высот, информация о правах, ограничениях и обременениях, сведения о зонах использования	Выявление пространственных коллизий и несоответствий
Уровень 03	Полный уровень	Интегрированная 3D-модель с полным набором характеристик, включая инженерные сети, оценку и историю изменений	Совместная работа заинтересованных сторон, интеграция с внешними системами
Уровень 04	Продвинутый уровень	«Цифровой двойник» территории с динамическим обновлением, интеграцией с системами мониторинга и прогнозированием	Управление жизненным циклом, автоматизированная оценка и принятие решений



Уровни детализации КИМ

Таблица 3. Матрица использования уровней детализации информационных моделей в сценариях внедрения КИМ

Сценарии	Уровень 00	Уровень 01	Уровень 02	Уровень 03	Уровень 04
C1		+	+	+	+
C2			+	+	+
C3				+	+
C4			+	+	+
C5			+	+	+
C6		+	+	+	+
C7				+	+

Данная классификация способствует поэтапному внедрению КИМ, где каждый последующий уровень добавляет степень детализации и функциональности, соответствующие требованиям конкретных сценариев применения.

Обсуждение

Разработка и внедрение КИМ представляет собой важный шаг в цифровизации кадастровой сферы Российской Федерации. Разработанные сценарии внедрения КИМ (C1–C7) и градация уровней детализации (от Уровня 00 до Уровня 04) демонстрируют практическую применимость предложенной структуры КИМ для решения актуальных задач кадастровой деятельности. Каждый сценарий соответствует конкретному уровню детализации: C1 и C6 реализуются на Уровне 01 (2D-моделирование границ), для Уровня 02 (3D-модели с технико-экономическими показателями) к предыдущим сценариям добавляются C2, C4, C5, сценарии C1–C7 ориентированы на Уровни 03–04 (полная интеграция с мониторингом и аналитикой). Такой подход обеспечивает поэтапное внедрение технологий LiDAR и информационного моделирования в кадастровую практику, минимизируя затраты на начальных этапах и масштабируя функциональность по мере накопления данных. Полученные результаты подтверждают целесообразность перехода от традиционного 2D-представления кадастровых данных к 3D-виду, особенно в условиях роста сложности объектов недвижимости и цифровизации госуслуг. Предложенная модель решает проблему дублирования данных между ЕГРН, ФНС и местными реестрами, обеспечивая единое информационное пространство для межведомственного взаимодействия.

Важной составляющей КИМ может стать интеграция методов машинного обучения, которая может повысить автоматизацию и качество обработки больших объемов кадастровых данных.

Машинное обучение (МО) может применяться для решения ряда ключевых задач: автоматической классификации и верификации кадастровых документов, выявления ошибок и несоответствий в данных, а также прогнозирования изменений кадастровой стоимости и анализа

правового статуса объектов недвижимости. Использование алгоритмов МО позволяет осуществлять интеллектуальную обработку разноформатной информации: текстовых описаний, сканированных документов, геопространственных данных и записей о правовых операциях.

Обучение интеллектуальных систем должно будет основываться на больших массивах данных, включая отсканированные документы, текстовые описания, геопространственные сведения и данные о правовых операциях. Использование нейросетевых моделей и алгоритмов МО значительно сократит ручной труд, снизит влияние человеческого фактора, при этом повысится оперативность и точность кадастровых операций [20, 21].

Разработанные рекомендации с учетом последующего внедрения МО открывают перспективы для создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений, автоматизации контроля и прогнозирования в кадастровой деятельности. Таким образом, КИМ выступает как платформа для цифровой трансформации, укрепляя нормативно-правовую базу и технологическую инфраструктуру кадастрового учета.

Заключение

По итогам анализа недостатков существующей системы 2D-кадастра предложен переход к трехмерному кадастру через внедрение кадастровой информационной модели. Разработанные рекомендации по формированию кадастровой информационной модели и семи сценариев внедрения КИМ (уточнение границ, инвентаризация ОКС, мониторинг деформаций, квартальная инвентаризация, формирование ЦМР, обновление ЕГРН по жалобам, классификация для налогообложения) создают основу для цифровой трансформации кадастровой сферы Российской Федерации. Предложенная классификация уровней детализации КИМ (Уровни 00–04) – от базового 2D-вида до цифровых двойников – обеспечивает поэтапное внедрение технологий.

Внедрение КИМ позволит обеспечить единообразную передачу структурированных данных в ФГИС ЕГРН, ФНС и ГИСОГД в различных форматах, минимизируя ошибки и ускоряя государственные процедуры.

Внедрение КИМ позволит создать основу для цифровой трансформации кадастровой сферы в России, способствуя созданию прозрачной, точной и оперативной системы управления недвижимостью. Дальнейшее развитие модели с учетом новых технологических возможностей и интеграции с интеллектуальными системами позволит обеспечить управление жизненным циклом объектов и повысить качество государственных услуг в сфере кадастра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Талапов В. В., Таныгина Е. А. Особенности создания информационной модели объекта недвижимости. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 7 : Междунар. науч. конф. «Молодежь. Инновации. Технологии». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 2. С. 16–20. DOI 10.33764/2618-981X-2020-7-2-16-20.

2. Талапов В. В. Об общей схеме информационной модели объекта строительства. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 1(697). С. 91–97.

3. Аврунев Е. И., Дорош М. П. Разработка информационной модели для повышения достоверности кадастровой информации. Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 1. С. 156–166.

4. Лисицкий Д. В., Осипов А. Г., Савиных В. Н. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». Новосибирск : СГУГиТ, 2022. С. 206–212. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.

5. Лисицкий Д. В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая земля» к системе виртуальной геореальности. Вестник СГГА. 2013. № 2(22). С. 8–16.

6. Николаев Н. А., Чернов А. В. Трехмерный кадастр недвижимости как новая ступень развития кадастровых систем. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользова-

ния, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. С. 194–198.

7. Рахмедьянов Ч. М., Чернов А. В., Ершов А. В. Анализ возможностей применения BIM для развития системы пространственных данных. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 7 : Международная научно-технологическая конференция сту-дентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии». Новосибирск : СГУГиТ, 2022. № 1. – С. 110–115.

8. Гура Д. А. Методологические принципы трехмерной идентификации объектов недвижимости. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 4. С. 109–116. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-109-116.

9. Дьяченко Р. А., Косолапов П. А., Гура Д. А. К вопросу об увеличении производительности машинного обучения на этапе выборки данных при решении задач классификации. Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 4. С. 146–155. DOI 10.17308/sait/1995-5499/2022/4/146-155.

10. Худик Е. С., Рубцов И. П. Информатизация кадастровой деятельности. Инструменты и механизмы природопользования России : сборник статей Региональной учебно–методической конференции, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Новочеркасск, 28 февраля 2020 г. Новочеркасск : Лик, 2020. С. 29–33.

11. Чернов А. В. Современные технологические решения при ведении кадастра в различных странах. Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов Национальной научно-практической конференции, 14–15 декабря 2017 г., Новосибирск. В 2 ч. Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Ч. 2. С. 3–8.

12. Bakels C. C. Crops produced in the southern Netherlands and northern France during the early medieval period: a comparison. Vegetation History and Archaeobotany. 2005. Vol. 14, No. 4. P. 394–399. DOI 10.1007/s00334-005-0067-x.

13. Осенняя Е. А., Шалая А. А., Шевченко Г. Г. Применение наземного лазерного сканирования для получения пространственной информации об объекте недвижимости в городе Краснодаре. Современные проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды : сборник докладов Международной научно–практической конференции, Тюмень, 06 декабря 2024 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2025. С. 197–202.

14. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Макаров Г. В. Применение наземного лазерного сканирования для создания трехмерных цифровых моделей Шуховской башни. Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 58–61.

15. Mutiarasari W. M.,Abdul Rahman A. 3D building models development based on data fusion – current status. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023. Vol. XLVIII–4/W6–2022. P. 269–272. DOI 10.5194/isprs-archives-xlviii-4-w6-2022-269-2023.

16. Jumanov B., Latipov Z., Habibullayev D., Abduahadov S. Application of laser scanning technology for digital modeling of objects on the earth's surface. Universum: технические науки. 2025. № 4.

17. Егорова И. С. 3D-кадастр как основа развития Единого государственного реестра недвижимости. Строительство и землеустройство: проблемы и перспективы развития: сборник трудов II Международной заочной научно–практической конференции, Тверь, 20 марта 2017 г. Тверь : Тверской государственный технический университет. 2017. С. 77–79.

18. Seipel S., Andrée M., Larsson K., Paasch J.M., Paulsson J. Visualization of 3d property data and assessment of the impact of rendering attributes. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis. 2020. Т. 4. № 2. С. 1–17.

19. Комиссаров А. В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование : учеб.-метод. пособие. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. С. 58.

20. Atik M. E., DuranZ., Seker D. Z. Explainable Artificial Intelligence for Machine Learning–Based Photogrammetric Point Cloud Classification. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2024. Vol. 17. P. 5834–5846. DOI 10.1109/jstars.2024.3370159.

21. Семенова Д. Е., Гиниятов И. А. Использование нейронных сетей в сфере кадастра недвижимости. Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сборник материалов VI Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной празднованию 90-летия НИИГАиК – СГГА – СГУГиТ, 23–25 ноября 2022 г., Новосибирск. В 3 ч. Новосибирск : СГУГиТ, 2023. Ч. 2. С. 182–188. DOI 10.33764/2687-041X-2023-2-182-188.

REFERENCES

1. Talapov V. V., Tanygina E. A. (2020). Specifics of creating an information model of a real estate object *Interekspo Geo–Sibir' [Interexpo Geo–Siberia]*, No. 2. P. 16–20. DOI 10.33764/2618-981X-2020-7-2-16-20 [in Russian].

2. Talapov, V. V. (2017). On the general scheme of the information model of a construction object. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]*, No. 1(697), 91–97 [in Russian].

3. Avrunev, E. I., & Dorosh, M. P. (2018). Development of an information model to improve the reliability of cadastral information. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii) [Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies]*, Vol. 23, No. 1, 156–166 [in Russian].

4. Lisitskii, D. V., Osipov, A. G., & Savinykh, V. N. (2022). Digital twin of territory and methods of geocomputational modeling. *Interekspo Geo–Sibir' [Interexpo Geo–Siberia]*, Vol. 1, 206–212. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212 [in Russian].

5. Lisitskii, D. V. (2013). Prospects for cartography development: from "Digital Earth" system to virtual georeality system. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi geodezicheskoi akademii [Bulletin of Siberian State Geodetic Academy]*, No. 2(22), 8–16 [in Russian].

6. Nikolaev, N. A., & Chernov, A. V. (2014). Three–dimensional real estate cadastre as a new stage in the development of cadastral systems. *Interekspo Geo–Sibir' [Interexpo Geo–Siberia]*, Vol. 2, 194–198 [in Russian].

7. Rakhmed'ianov, Ch. M., Chernov, A. V., & Ershov, A. V. (2022). Analysis of BIM application possibilities for spatial data system development. *Interekspo Geo–Sibir' [Interexpo Geo–Siberia]*, Vol. 7, No. 1, 110–115 [in Russian].

8. Gura, D. A. (2025). Methodological principles of three–dimensional identification of real estate objects. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii) [Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies]*, Vol. 30, No. 4, 109–116. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-109-116 [in Russian].

9. Diachenko, R. A., Kosolapov, P. A., & Gura, D. A. (2022). On improving machine learning performance at the data sampling stage for classification problems. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriia: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii [Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies]*, No. 4, 146–155. DOI 10.17308/sait/1995-5499/2022/4/146-155 [in Russian].

10. Khudik, E. S., & Rubtsov, I. P. (2020). Informatization of cadastral activities. *In Instrumenty i mekhanizmy prirodopo l'zovaniia Rossii: Sbornik statei Regional'noi uchebno–metodicheskoi konferentsii, posviashchennoi 75–letiiu pobedy v Velikoi Otechestvennoi voine [Tools and mechanisms of nature management in Russia: Collection of articles of the Regional Scientific–Methodological Conference dedicated to the 75th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War]*, Novocherkassk, February 28, 2020 (pp. 29–33). Novocherkassk: OOO "Lik" [in Russian].

11. Chernov, A. V. (2018). Modern technological solutions in cadastre management in various countries. *In Reguliovanie zemel'no–imushchestvennykh otnoshenii v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiia, tekhnologicheskie resheniia [Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions]*, Vol. 2, 3–8 [in Russian].

12. Bakels, C. C. (2005). Crops produced in the southern Netherlands and northern France during the early medieval period: a comparison. *Vegetation History and Archaeobotany*, Vol. 14, No. 4, 394–399. DOI 10.1007/s00334-005-0067-x.

13. Osenniaia, E. A., Shalaya, A. A., & Shevchenko, G. G. (2025). Application of terrestrial laser scanning to obtain spatial information about real estate objects in Krasnodar. *In Sovremennye problemy zemel'no–imushchestvennykh otnoshenii, urbanizatsii territorii i formirovaniia komfortnoi gorodskoi sredy: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno–prakticheskoi konferentsii [Modern problems of land and property relations, territory urbanization and formation of comfortable urban environment: Collection of reports of the International Scientific–Practical Conference]*, Tyumen, December 6, 2024 (pp. 197–202). Tyumen: Tyumenskii industrial'nyi universitet [in Russian].

14. Mustafin, M. G., Valkov, V. A., & Makarov, G. V. (2013). Application of terrestrial laser scanning for creating three–dimensional digital models of Shukhov Tower. *Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of Mining Institute]* 24, 58–61 [in Russian].

15. Mutiarasari, W. M., Abdul Rahman A. (2023). 3D building models development based on data fusion – currentstatus. *[The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences]*, Vol. XLVIII–4/W6–2022. (pp. 269–272), DOI 10.5194/isprs-archives-xlviii-4-w6-2022-269-2023.

16. Jumanov B., Latipov Z., Habibullayev D., Abduahadov S. (2025). Application of laser scanning technology for digital modeling of objects on the Earth's surface. *Universum: tekhnicheskie nauki*. No. 4.

17. Egorova I. S. (2017). 3D cadastre as the basis for the development of the Unified State Register of Real Estate. *In Stroitel'stvo i zemleustroistvo: problemy i perspektivy razvitiia: sbornik trudov II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Construction and land management: problems and development prospects: collection of works of the II International correspondence scientific-practical conference]*, Tver, 20 March 2017 (pp. 77–79). Tver: Tverskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet [in Russian].

18. Seipel S., Andrée M., Larsson K., Paasch J. M., Paulsson J. (2020). Visualization of 3D property data and assessment of the impact of rendering attributes. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis.* Vol. 4. No. 2. Pp. 1–17.

19. Komissarov A. V. (2020). Lazernoe skanirovanie i tremenoe modelirovanie: uchebno–metodicheskoe posobie *[Laser scanning and three–dimensional modeling: teaching aid]*. Novosibirsk: SGUGiT, p. 58 [in Russian].

20. Atik M. E., Duran Z., Seker D. Z. Explainable Artificial Intelligence for Machine Learning–Based Photogrammetric Point Cloud Classification *[IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing],* Vol. 17, (pp. 5834–5846), DOI 10.1109/jstars.2024.3370159[in English].

21. Semenova, D. E., & Giniatov, I. A. (2023). Use of neural networks in real estate cadastre. *Reguliovanie zemel'no–imushchestvennykh otnoshenii v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiia, tekhnologicheskie resheniia [Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions]*, No. 2, 182–188. DOI 10.33764/2687-041X-2023-2-182-188 [in Russian].

Об авторах

Анастасия Александровна Панютищева – магистрант.

Гриттель Геннадьевна Шевченко – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и геонженерии.

Author details

Anastasia A. Panyutischeva – Master Student.

Grittel G. Shevchenko – PhD, Associate Professor, Department of Cadastre and Geoengineering.

Получено / Received 12.03.2026
Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2026
Принята к публикации / Accepted 07.09.2026

Научно-практическая статья/Research article
УДК 332.3:004.93`1
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-169-178

Реализация методики выявления неиспользуемых земельных участков в среде Q-GIS

Е. Д. Подрядчикова[1], И. В. Раева[1]✉, Н. В. Киселев[1]

[1] Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

e-mail: irinaf_98@mail.ru

Аннотация. Эффективное управление земельными ресурсами является основой устойчивого развития общества. В этом контексте выявление неиспользуемых земельных участков (ЗУ) становится ключевой задачей, способствующей рациональному планированию и развитию территорий. Подходы к выявлению таких ЗУ, основанные на ручной проверке и анализе разрозненных данных, характеризуются высокой трудоемкостью, значительными временными затратами и риском ошибок. В ответ на эти вызовы, а также в условиях активной цифровизации возникает острая потребность в разработке автоматизированных и высокоточных инструментов. В статье представлена комплексная методика для инновационного подхода к автоматизированному выявлению неиспользуемых ЗУ в среде Q-GIS. Программный модуль «Анализатор использования земельных участков» эффективно обрабатывает данные дистанционного зондирования Земли для точного выявления отклонений от целевого назначения. Основная цель исследования – разработка и апробация программного модуля в среде Q-GIS. Модуль предназначен для автоматического выявления неиспользуемых ЗУ. Он анализирует индекс нормализованной вегетационной растительности (NDVI), рассчитывает транспортную доступность ЗУ от заданной точки и представляет результат в таблице атрибутов.

Ключевые слова: индекс нормализованной вегетационной растительности, неиспользуемый земельный участок, населенный пункт, космические снимки, Тюмень, дистанционное зондирование Земли, мониторинг земель, Q-GIS

Для цитирования:
Подрядчикова Е. Д., Раева И. В., Киселев Н. В. Реализация методики выявления неиспользуемых земельных участков в среде Q-GIS. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 169–178. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-169-178

A QGIS-based framework for automated identification of unused land plots

E. D. Podryadchikova[1], I. V. Raeva[1]✉, N. V. Kiselyov[1]

[1] Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

e-mail: irinaf_98@mail.ru

Abstract. Effective land management constitutes a fundamental pillar of sustainable territorial development. Within this framework, the precise identification of unused or inefficiently utilized land parcels (LPs) becomes a key issue that contributes to rational planning and development of territories. Conventional methodologies for LP detection, primarily relying on manual cadastral verification and

© Е. Д. Подрядчикова, И. В. Раева, Н. В. Киселев, 2026

the analysis of fragmented registry data, are characterized by excessive labor intensity, significant temporal costs, and a high susceptibility to subjective errors. In light of ongoing digital transformation initiatives, there is an exigent demand for scalable, automated tools capable of objective environmental monitoring. The study addresses this lacuna by proposing a comprehensive methodology for the automated detection of derelict land within the open-source QGIS environment. The authors introduce the "Land Parcel Utilization Analyzer" software module, which integrates multispectral remote sensing analytics with geospatial network modeling to identify deviations from designated land-use purposes. The primary objective of this research is the conceptualization, algorithmic design, and pilot implementation of the said software module. Unlike existing solutions that often focus solely on spectral indices, the proposed approach employs a multi-criteria assessment model that analyzes the normalized difference vegetation index (NDVI), calculates the transport accessibility of the LP from a given point to specified reference infrastructure points and presents the result in the attribute table.

Keywords: Normalized difference vegetation index, unused land plot, populated area, space images, Tyumen, remote sensing of the Earth, land monitoring, Q-GIS

For citation:
Podryadchikova E. D., Raeva I. V., Kiselyov N. V. (2026). A QGIS-based framework for automated identification of unused land plots. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 169–178. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-169-178

Введение

Главная задача выявления неиспользуемых ЗУ заключается в стимулировании граждан возвращаться к своим брошенным ЗУ и принимать решения об их освоении или продаже, что соответствует предписаниям о необходимости использования земель по целевому назначению.

Используемые не по целевому назначению и неиспользуемые ЗУ представляют собой упущенную экономическую выгоду государства, а также негативно влияют на градостроительный облик населенного пункта [1]. Выявление и вовлечение таких ЗУ в оборот является актуальной задачей, которая требует разработки автоматизированных программ [2, 3].

Целью исследования является разработка и апробация программного модуля для выявления неиспользуемых ЗУ на основе анализа индекса NDVI и признаков, установленных новым постановлением Правительства Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1) проанализировать новое постановление Правительства Российской Федерации;

2) разработать методику выявления неиспользованных ЗУ с применением индекса NDVI;

3) разработать программный модуль «Анализатор использования земельных участков»;

4) выполнить апробацию разработанного программного модуля на территории города Тюмени.

Неиспользуемые ЗУ определены согласно новому, недавно утвержденному Постановлению Правительства Российской Федерации от 31.05.2025 № 826 «Об установлении признаков неиспользования земельных участков из состава земель населенных пунктов, садовых земельных участков и огородных земельных участков».

Признаки дифференцируются в зависимости от назначения ЗУ (населенные пункты, индивидуальное жилищное строительство, садоводческие и огородные участки). Они включают отсутствие застройки, разрушение объектов на участке, захламление территории, отсутствие сельскохозяйственной деятельности и т. д. Для садоводческих и огородных участков характерным признаком является отсутствие возделывания сельскохозяйственных культур, а для других земель – наличие сорной растительности (выше 1 метра), захламление или загрязнение.

Важно отметить, что данное постановление предусматривает введение серьезных мер ответственности, таких как штрафы, за неиспользование ЗУ по целевому назначению, а также за их зарастание сорной растительностью или отсутствие благоустройства.

Данные признаки, особенно касающиеся состояния растительного покрова, могут быть эффективно выявлены и проанализированы с использованием данных дистанционного зондирования Земли, что позволяет автоматизировать процесс мониторинга и выявления таких ЗУ в масштабах крупных территорий [4].

Объект и методика исследования

Данное исследование посвящено разработке и апробации инновационного подхода для выявления неиспользуемых ЗУ. Объектом исследования являются ЗУ индивидуального жилищного строительства (ИЖС), а также садовые и огородные участки в Тюмени.

Предметом исследования является разработанный авторами статьи программный модуль «Анализатор использования земельных участков» [5].

Постановлением Правительства Российской Федерации от 31.05.2025 № 826 установлены признаки неиспользования ЗУ из состава земель населенных пунктов, садовых и огородных ЗУ. На рис. 1 представлена выявленная авторами статьи взаимосвязь признаков неиспользования ЗУ и индекса NDVI.

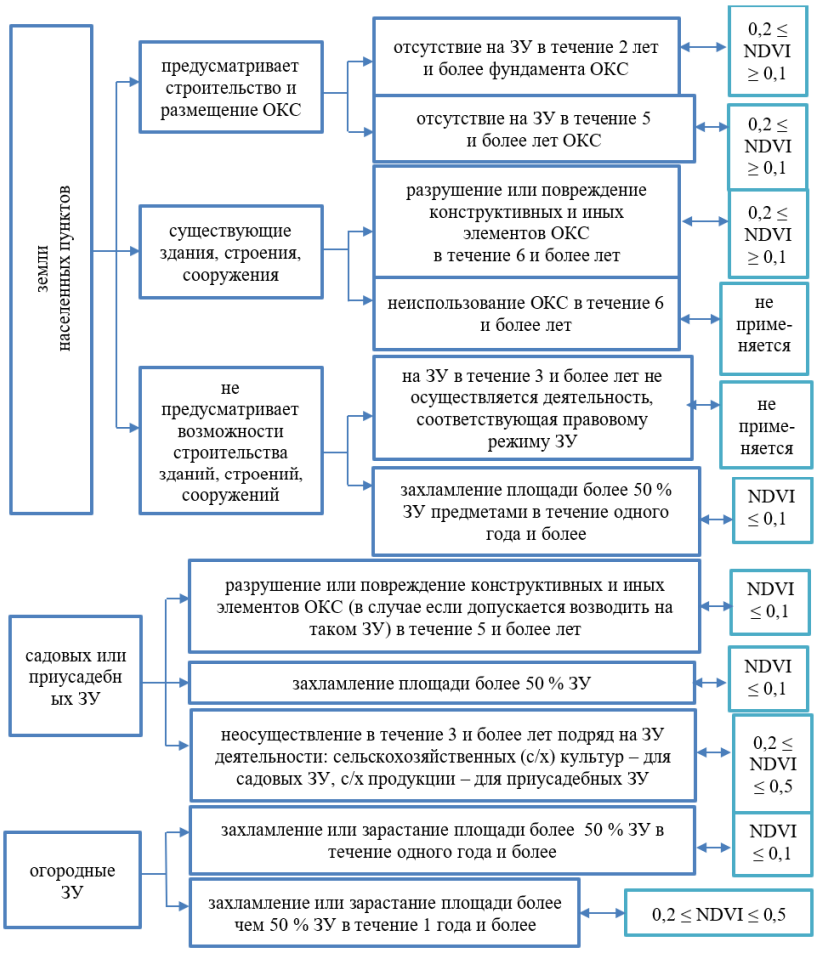


Рис. 1. Взаимосвязь признаков неиспользования ЗУ и индекса NDVI

В данном контексте одним из ключевых показателей, извлекаемых из спутниковых изображений для оценки растительного покрова, является индекс NDVI [6]. Он позволяет количественно оценить плотность растительности: высокие значения указывают на густую растительность, тогда как низкие характерны для объектов без растительного покрова, таких как почва, вода или застроенные территории [7]. Анализ динамики индекса NDVI на конкретных ЗУ, особенно в сопоставлении с их целевым назначением, позво-

ляет выявлять аномалии, свидетельствующие о возможном неиспользовании или ненадлежащем использовании [8].

Для разработки программного модуля на языке программирования Python в среде Q-GIS рекомендуется использовать библиотеки, такие как Pandas для обработки данных, Geopandas для работы с геопространственными данными, Matplotlib и Seaborn для визуализации [9–11].

Методика выявления неиспользуемых ЗУ в данном исследовании включает в себя четыре этапа, представленные на рис. 2.

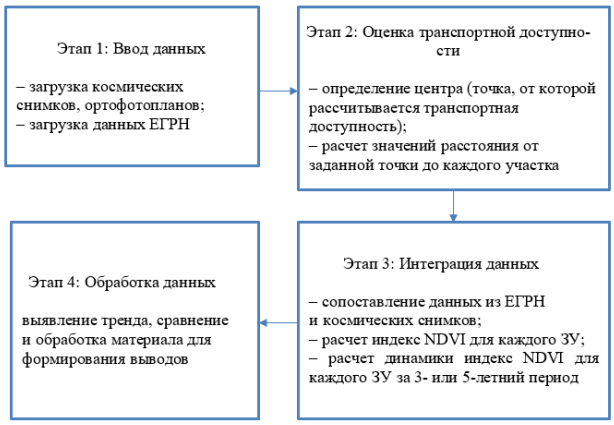


Рис. 2. Методика выявления неиспользуемых ЗУ

На первом этапе необходимо загрузить данные дистанционного зондирования Земли (космические снимки), отражающие состояние территории за интересующие года (от 3 до 5 лет) в Q-GIS. Также в качестве исходных данных нужны данные ЕГРН в виде кадастрового плана территории (КПТ).

Так как программный модуль рассчитывает индекс NDVI, снимки должны содержать данные в красном (620–670 нм) и ближнем инфракрасном диапазонах (850–880 нм). Минимальный допустимый размер ЗУ согласно Земельному кодексу и Градостроительному кодексу РФ определяют Правила землепользования и застройки (ПЗЗ), но в среднем ЗУ под ИЖС составляют не менее 300 м^2; в связи с этим необходимы спутниковые или аэрофотоснимки с высоким пространственным разрешением (желательно 10–20 м). Не менее важно, чтобы изображения были свободны от облаков и атмосферных искажений, откорректированы по геометрии и радиометрии, а также получены в период активного вегетационного сезона, т. е. летом, для точной оценки состояния растительности.

На втором этапе осуществляется автоматический расчет расстояния транспортной доступности относительно центра города (точка центра может быть задана вручную на карте или указываться по координатам). В результате работы программного модуля «Анализатор использования земельных участков» каждому ЗУ присваивается значение транспортной доступности в метрах [12].

Ранжирование ЗУ по транспортной доступности необходимо для приоритетного распределения земельных ресурсов в городе, что позволяет выделить участки с высокой доступностью для развития инфраструктуры и инвестиций. Оно оптимизирует градостроительное планирование, упрощая процесс принятия решений при планировании размещения новых объектов и зон [13].

Третий этап осуществляется после сопоставления границ ЗУ и космических снимков. Задача состоит в том, чтобы сопоставить данные о границах ЗУ, вид его разрешенного использования и состояние растительности, задействуя индекс NDVI. Программный модуль рассчитывает индекс NDVI на основе мультиспектральных изображений и проведения дифференцированного анализа состояния растительного покрова в пределах ЗУ с учетом классификации пикселей в границах ЗУ. Это дает возможность определить, какие ЗУ не используются за заданный период времени.

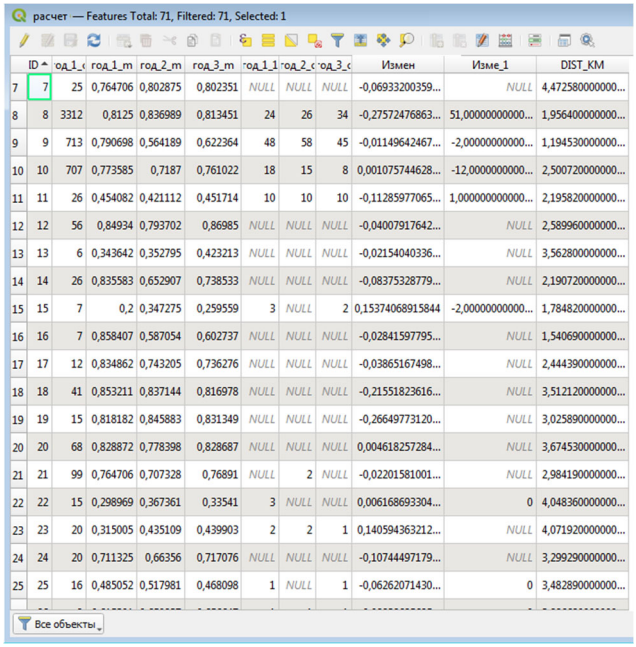
Для этого программный модуль сопоставляет геопространственное расположение границ ЗУ и данных о состоянии растительности, полученных с помощью индекса NDVI. Анализируя временные ряды (3- или 5-летний период) индекса NDVI для каждого ЗУ, можно отслеживать динамику его использования в течение заданного периода.

На этом этапе применяется стандартная дискретная шкала индекса NDVI. Например, низкие значения индекса NDVI (NDVI ≤ 0,1, см. рис. 1) характерны для объектов без растительного покрова, таких как застроенная

территория, а высокие значения, указывающие на зарастание участков, предназначенных под застройку, могут свидетельствовать о неиспользовании ЗУ, захламление или зарастании ЗУ сорной растительность (0,2 ≤ NDVI ≤ 0,5, см. рис. 1). Диапазон от 0,1 до 0,2 в летний период показывает наличие газонов или открытой почвы. При пространственном разрешении 10–20 м плотность растительности будет усреднена и растительность может не быть плотной; в таком случае потребуются полевые обследования или использование данных со сверхвысоким пространственным разрешением. Дискретная шкала представлена на рис. 3.

Рис. 3. Дискретная шкала индекса NDVI

Итогом работы программного модуля «Анализатор использования земельных участков» является таблица атрибутов. В ней отображаются: площадь объекта, индекс NDVI за исследуемые годы, показатель плотности застройки, изменение индекса NDVI, изменение плотности застройки и расстояние от выбранной точки до ЗУ (рис. 4).



расчет — Features Total: 71, Filtered: 71, Selected: 1

	ID	год_1_с	год_1_m	год_2_m	год_3_m	год_1_1	год_2_с	год_3_с	Измен	Изме_1	DIST_KM
7	7	25	0,764706	0,802875	0,802351	NULL	NULL	NULL	-0,06933200359...	NULL	4,472580000000...
8	8	3312	0,8125	0,836989	0,813451	24	26	34	-0,27572476863...	51,00000000000...	1,956400000000...
9	9	713	0,790698	0,564189	0,622364	48	58	45	-0,01149642467...	-2,00000000000...	1,194530000000...
10	10	707	0,773585	0,7187	0,761022	18	15	8	0,001075744628...	-12,00000000000...	2,500720000000...
11	11	26	0,454082	0,421112	0,451714	10	10	10	-0,11285977065...	1,000000000000...	2,195820000000...
12	12	56	0,84934	0,793702	0,86985	NULL	NULL	NULL	-0,04007917642...	NULL	2,589960000000...
13	13	6	0,343642	0,352795	0,423213	NULL	NULL	NULL	-0,02154040336...	NULL	3,562800000000...
14	14	26	0,835583	0,652907	0,738533	NULL	NULL	NULL	-0,08375328779...	NULL	2,190720000000...
15	15	7	0,2	0,347275	0,259559	3	NULL	2	0,15374068915844	-2,00000000000...	1,784820000000...
16	16	7	0,858407	0,587054	0,602737	NULL	NULL	NULL	-0,02841597795...	NULL	1,540690000000...
17	17	12	0,834862	0,743205	0,736276	NULL	NULL	NULL	-0,03865167498...	NULL	2,444390000000...
18	18	41	0,853211	0,837144	0,816978	NULL	NULL	NULL	-0,21551823616...	NULL	3,512120000000...
19	19	15	0,818182	0,845883	0,831349	NULL	NULL	NULL	-0,26649773120...	NULL	3,025890000000...
20	20	68	0,828872	0,778398	0,828687	NULL	NULL	NULL	0,004618257284...	NULL	3,674530000000...
21	21	99	0,764706	0,707328	0,76891	NULL	2	NULL	-0,02201581001...	NULL	2,984190000000...
22	22	15	0,298969	0,367361	0,33541	3	NULL	NULL	0,006168693304...	0	4,048360000000...
23	23	20	0,315005	0,435109	0,439903	2	2	1	0,140594363212...	NULL	4,071920000000...
24	24	20	0,711325	0,66356	0,717076	NULL	NULL	NULL	-0,10744497179...	NULL	3,299290000000...
25	25	16	0,485052	0,517981	0,468098	1	NULL	1	-0,06262071430...	0	3,482890000000...

Все объекты

Рис. 4. Таблица атрибутов программы Q-GIS

Права на программный модуль зарегистрированы, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665627 от 18.06.2025 [12].

Результаты

На основе предложенной методики (см. рис. 3) проведен анализ всех кварталов Тюмени с видом разрешенного использования «ведение садоводства и огородничества». Результаты показали, что разработанная методика позволяет выявлять с высокой точностью (до 92 %) ЗУ, которые:

– находятся в пределах ключевых транспортно-доступных радиусов (например, 1 км транспортной доступности);

– не используются в соответствии с их целевым назначением (например, участки зарегистрированы под ИЖС, но фактически пустующие);

– имеют высокий уровень растительности согласно индексу NDVI, что может указывать на их запущенное состояние или отсутствие инфраструктурных улучшений.

Кроме того, анализ показал, что учет индекса NDVI при выявлении неиспользования участков позволяет дополнительно классифицировать их по степеням запущенности и фактическому наличию зеленых насаждений.

Для наглядности результатов выбран кадастровый квартал с номером 72:23:0208001, состоящий из 71 ЗУ, фрагмент таблицы атрибутов данного квартала представлен на рис. 4.

Согласно анализу ПЗЗ, в пределах данного кадастрового квартала преобладающей территориальной зоной является зона рекреационного назначения. Наряду с этим в составе квартала также присутствуют участки, классифицированные как зона застройки индивидуальными жилыми домами, общественно-деловая зона застройки специализированных центров обслуживания и зона размещения производственных объектов IV–V классов вредности. Бордовым контуром показана граница кадастрового квартала (рис. 5).

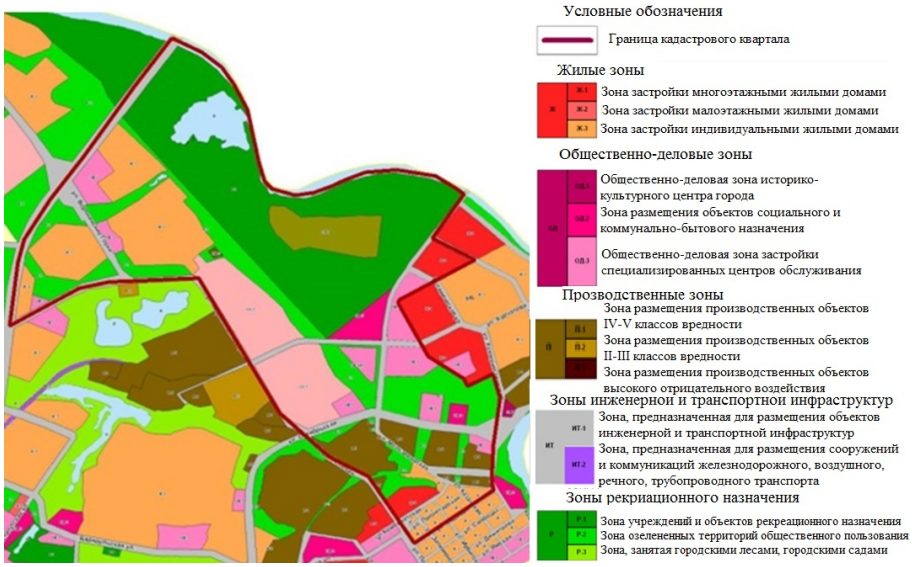


Рис. 5. Фрагмент ПЗЗ с границей кадастрового квартала

В пределах данного кадастрового квартала (72:23:0208001) обнаружен ЗУ с кадастровым номером 72:23:0208001:1636. Анализ его состояния в течение 5 лет показывает следующую динамику: в 2020 г. участок характеризовался значительным уровнем зарастания. В 2021 г. были проведены работы, приведшие к нарушению его поверхности (перекопка). С 2022 по 2024 г. наблюдается процесс восстановления растительного покрова (вторичное зарастание). Расчет индекса проводился на основе спутниковых данных с использованием программного обеспечения.

В целях иллюстрации результатов проведенного анализа (динамики индекса NDVI) в таблице приведены исходные спутниковые изображения за 2020, 2021 и 2024 гг.

Анализ спутниковых изображений ЗУ с кадастровым номером 72:23:0208001:1636

Спутниковые изображения			
Год	2020	2021	2024
Значение индекса NDVI	0,54	0,14	0,84

Визуальная проверка результатов анализа на основе исходных спутниковых изображений подтверждает надежность и корректность функционирования программы.

Для демонстрации применения методики в условиях полного отсутствия растительности рассмотрен пример застроенного ЗУ с кадастровым номером 72:23:0208001:2148. На рис. 6 представлен космический снимок данного ЗУ за 2024 г. Границы ЗУ выделены красной полилинией.

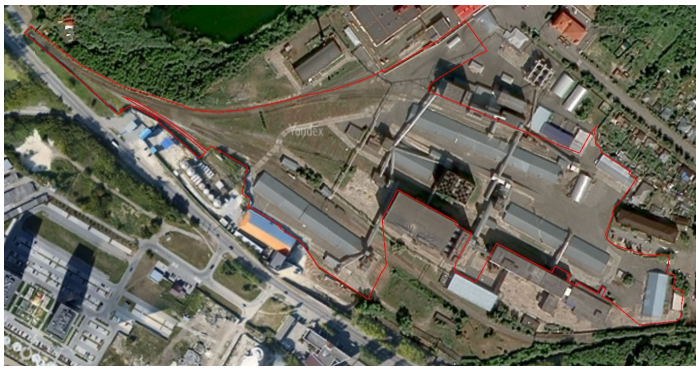


Рис. 6. Спутниковое изображение ЗУ с кадастровым номером 72:23:0208001:2148 в 2024 г.

Мониторинг участка на протяжении пятилетнего интервала показал, что значения индекса NDVI варьировались в пределах от 0,13 до 0,14, что говорит о низком уровне вегетационного покрова на данном ЗУ. При этом показатель площади искусственных покрытий (включая элементы застройки и дорожную инфраструктуру) находился в диапазоне от 475 до 510 единиц (рис. 7).

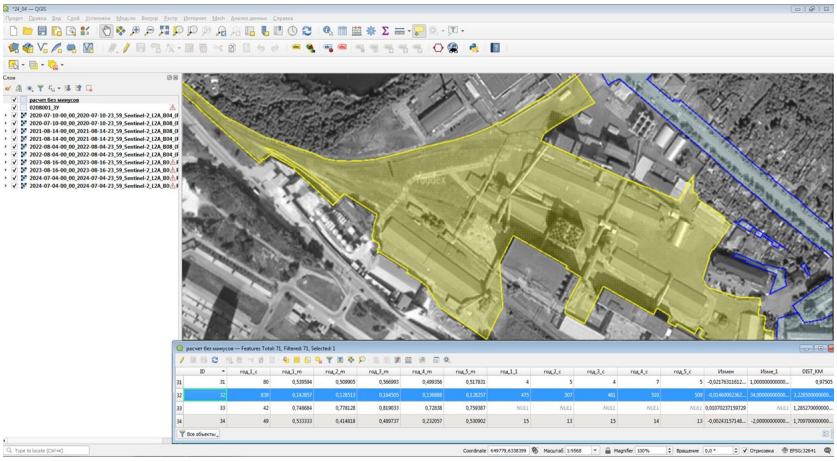


Рис. 7. Функциональное окно Q-GIS с таблицей атрибутов

Такое соотношение показателей подтверждает, что низкий уровень озеленения обусловлен высокой долей застроенных и инфраструктурных территорий на данном участке. Это свидетельствует о том, что участок в значительной степени определяется наличием зданий и инфраструктуры.

Выводы

На основе предложенной методики успешно проведен анализ ряда кадастровых кварталов Тюмени. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что разработанный программный модуль «Анализатор использования земельных участков» позволяет с высокой точностью выявлять ЗУ, соответствующие признакам неиспользования, при помощи уровня растительного покрова, оцениваемого по индексу NDVI. Использование индекса NDVI при этом не только способствует выявлению таких участков, но и дает возможность дополнительно классифицировать их по степени запущенности.

Анализ конкретных кадастровых кварталов и участков, включая демонстрацию динамики индекса NDVI за несколько лет на основе исходных спутниковых изображений, наглядно

проиллюстрировал работоспособность программного модуля. Наиболее важным подтверждением является визуальная проверка результатов анализа по исходным спутниковым изображениям, которая подтвердила надежность и корректность функционирования разработанного программного модуля.

Таким образом, программный модуль «Анализатор использования земельных участков» является эффективным и корректно работающим инструментом, пригодным для комплексного анализа ЗУ и выявления территорий с потенциалом для оптимизации использования, что имеет существенное значение для городского планирования и улучшения качества городской среды.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность внедрений технологий искусственных нейронных сетей для выполнения комплексного анализа результатов и выявления более сложных закономерностей появления неиспользуемых ЗУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захарова Е. Н., Астахова И. А. Эффективное управление земельными ресурсами как фактор устойчивого развития территории. Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Экономика. 2010. № 1. С. 48–55.

2. Рубанов В. А., Серебряков С. В., Кучкаров З. А., Никитин А. В., Зеленфройнд М. Г. Аналитическое исследование «цифровая трансформация отраслей на основе использования ГИС, ДЗЗ и БАС»: аналитический отчет. Москва, 2022. 381 с.

3. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Кулик Е. Н. Идентификация сельскохозяйственных культур на основе использования данных дистанционного зондирования Земли : сборник материалов международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». 2016. Т. 1. С. 21– 24.

4. Мунзер Н. Разработка методики применения данных космических съемок для мониторинга земель : дис. …канд. техн. наук. / Мунзер Нур. Москва, 2021. 150 с.

5. Подрядчикова Е. Д., Раева И. В. Применение искусственной нейронной сети для формирования радиусов транспортной доступности и выявления неэффективно используемых земельных участков. Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сборник материалов VII Национальной научно-практической конференции с международным участием, 21–24 ноября 2023 г., Новосибирск. В 3 ч. Новосибирск : СГУГиТ, 2024. Ч. 2. С. 60–64.

6. Малыгина О. И., Попп Е. С. Цифровизация сельского хозяйства для выявления неиспользуемых земель. Информационные технологии, системы и приборы в АПК. Агроинфо-2021. Материалы 8-й Международной научно-практической конференции. 2021. С. 84–86.

7. Головин П. Н., Богданов В. Л. Применение ГИС-технологий для оценки и повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель в агроландшафтах на основе дистанционных и полевых данных. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29. №1. С. 73–87. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-73-87.

8. Сисей Фафа К., Орловский А. В. Расчет индекса NDVI по данным дистанционного зондирования земли и проведение на его основе геоанализа с целью определения границ, площади и изменения зеленых насаждений. Научный Лидер. 2022. № 10 (55).

9. Ильичев В. Ю., Юрик Е. А. Анализ массивов данных с использованием библиотеки Pandas для Python. Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 4. С. 41–45.

10. Таршхоева Ж. Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python. Молодой ученый. 2021. № 5(347). С. 20–21.

11. Пономарьков М. Я., Панов М. А. Анализ динамики посещения туристических объектов с использованием географических информационных систем и языка программирования Python. Цифровые модели и решения. 2024. Т. 3, № 3. С 5–23.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665627 Российская Федерация. Анализатор использования земельных участков : заявл. 02.06.2025 : опубл. 18.06.2025 / Е. Д. Подрядчикова, И. В. Раева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

13. Карпик А. П., Мусихин И. А., Ветошкин Д. Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 2. С. 155–163. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.

REFERENCES

1. Zakhrova, E. N., Astakhova, I. A. (2010). Effektivnoe upravlenie zemelnymi resursami kak faktor ustoychivogo razvitiya territorii. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: ekonomika [Bulletin of Adygea State University. Series: Economics],* 1, 48–55 p. [in Russian].

2. Rubanov, V. A., Serebryakov, S. V., Kuchkarov, Z. A., Nikitin, A. V., Zelenfroind, M. G. (2022). *Analytical study on "Digital transformation of sectors based on the use of GIS, remote sensing, and spatial analysis*" [*Analiticheskoe issledovanie «tsifrovaya transformatsiya otraslei na osnove ispol'zovaniya GIS, DZZ i BAS*]: analytical report. Moscow, 381 p. [in Russian].

3. Sakharova, E. Y., Sladkikh, L. A., Kulik, E. N. (2016). Identification of agricultural crops based on the use of remote sensing data. *In Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii Distantsionnye metody zondirovaniya zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchei sredy, geoehkologiya [Remote Sensing Methods and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* Vol. 1, pp. 21–24 [in Russian].

4. Munzer Nur (2021). *Development of a Methodology for Using Satellite Data for Land Monitoring [Razrabotka metodiki primeneniya dannykh kosmicheskikh s"emok dlya monitoringa zemel']*. Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow, 150 p. [in Russian].

5. Podryatchikova, E. D., Raeva, I. V. (2024). Application of artificial neural networks for forming transport accessibility radii and identifying inefficiently used land plots. *In Sbornik materialov Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnoshenii v Rossii: pravovoe i geoprostran-stvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ehkologiya, tekhnologicheskie resheniya. [Proceedings of National Scientific and Practical Conference. Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions*. Vol. 2, pp. 60–64 [in Russian].

6. Maligina, O. I., Popp, E. S. (2021). Digitalization of agriculture for identifying unused land. *In Sbornik materialov 8th Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Informatsionnye tekhnologii, sistemy i pribory v APK. Agroinfo-2021 [Proceedings of 8th International Scientific and Practical Conference: Information Technologies, Systems, and Devices in Agriculture. Agroinfo-2021]* (pp. 84–86) [in Russian].

7. Golovin, P. N., Bogdanov, V. L. (2024). Application of GIS technologies for assessing and enhancing the efficiency of agricultural land use in agro-landscapes based on remote sensing and field data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(1), 73–87. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-73-87 [in Russian].

8. Sisei, F. F. K., Orlovsky, A. V. (2022). Calculation of the NDVI index based on remote sensing data and conducting geo-analysis to determine the boundaries, area, and changes in green spaces. *Scientific Leader [Nauchnyi Lider],* (10), 55. [in Russian].

9. Ilyichev, V. Yu., Yurik, E. A. (2020). Data array analysis using the Pandas library for Python. *Scientific Review. Technical Sciences [Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki]* (4), pp. 41–45. [in Russian].

10. Tarshkhoyeva, Zh. T. (2021). Programming Language Python. Python Libraries. *Young Scientist [Molodoi uchenyi]* 5(347), pp. 20–21 [in Russian].

11. Ponomarykov, M. Y., Panov, M. A. (2024). Analysis of the Dynamics of Tourist Object Visits Using Geographic Information Systems and the Python Programming Language. *Digital Models and Solutions [Tsifrovye modeli i resheniya]*, 3(3), pp. 5–23 [in Russian].

12. Certificate of state registration of a computer program No. 2025665627 Russian Federation. Land use analyzer: declared. 02.06.2025: published. 18.06.2025 / E. D. Podryadchikova, I. V. Raeva; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen Industrial University".

13. Karpik, A. P., Musikhin, I. A., & Vetoshkin, D. N. (2021). Intelligent Information Models of Territories as an Effective Tool for Spatial and Economic Development. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* 26(2), 155–163. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163 [in Russian].

Об авторах

Екатерина Дмитриевна Подрядчикова – кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Ирина Валентиновна Раева – аспирант кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Никита Владимирович Киселев – аспирант кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Author details

Ekaterina D. Podryadchikova – PhD, Department of Geodesy and Cadastral Activity.

Irina V. Raeva – PhD Student, Department of Geodesy and Cadastral Activity.

Nikita V. Kiselyov – PhD Student, Department of Geodesy and Cadastral Activity.

Получено / Received 08.08.2025
Поступила после рецензирования / Revised 03.09.2025
Принята к публикации / Accepted 05.10.2026

Научно-поисковая статья /Research article
УДК 332.3:004.9
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-179-187

Технологические аспекты интеграции информационной модели объекта недвижимости в структуру данных ЕГРН

А. А. Харазян [1,2]✉

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

e-mail: gubinaaa@kuzstu.ru

Аннотация. В статье выполнено описание содержания информационной модели объекта недвижимости в ЕГРН в части объектов кадастрового учета – ОКС, определены основные и дополнительные сведения об объекте недвижимости, содержащиеся в кадастровом слое информационной модели (ИМ). Проанализирован технологический процесс формирования информационной модели объекта недвижимости для целей кадастра недвижимости (кадастровой деятельности) – подготовки технического плана. Выявлено, что раздел проектной документации «Схема планировочной организации земельного участка», а также смежные с ним разделы, такие как «Архитектурные решения» и «Конструктивные решения» являются фундаментом для формирования и наполнения ИМ, а также источником данных для осуществления кадастрового учета объекта. Обосновано, что на данный момент времени процесс интеграции сведений из информационной модели в структуру данных ЕГРН происходит не напрямую, а путем конвертации и выгрузки плоского набора данных из модели (XML-схем, графических приложений). Установлено, что в настоящее время наблюдается несогласованность между высоким уровнем детализации ИМ объекта недвижимости и лимитированными ресурсами и возможностями ЕГРН по таким функциям, как прием, сбор и хранение данных ИМ в ее исходном («родном») формате.

Ключевые слова: информационная модель объекта недвижимости, жизненный цикл объекта недвижимости, ЕГРН, ТИМ, кадастр недвижимости, основные и дополнительные сведения, ГКУ, проектная документация

Для цитирования:
Харазян А. А. Технологические аспекты интеграции информационной модели объекта недвижимости в структуру данных ЕГРН. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 179–187. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-179-187

Technological aspects of integrating a cadastral information model into the Unified State Register of Real Estate data structure

A. A. Kharazyan [1,2]✉

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation

e-mail: gubinaaa@kuzstu.ru

© А. А. Харазян, 2026

Abstract. The article delineates the scope of the property information model maintained within Russia's Unified State Register of Real Estate (USRE), focusing on registered capital construction assets. The research specifies both primary attributes and ancillary metadata stored within the cadastral layer of the digital repository. Furthermore, it analyzes the technological workflow governing the generation of property information models (PIMs) for statutory cadastral surveying – specifically, the compilation of technical plans. Findings indicate that design documentation modules, notably the site development plan, alongside Architectural and Structural solution sets, constitute the fundamental data backbone for populating the PIM. These components subsequently serve as the authoritative input for title registration. The analysis reveals a critical systemic misalignment: current interoperability between PIM environments and the USRE is non-native. Rather than direct seamless integration, the process relies on the 2D spatial data via XML schema serialization and static graphical exports. Consequently, a systemic misalignment exists wherein the granularity of modern property information models exceeds the ingestion capacity and archival architecture of the USRE, which remains constrained in its ability to retain data in proprietary or native formats.

Keywords: property information model, USRE, TIM, real estate cadaster, primary and ancillary information, GKU, project documentation

For citation:
Kharazyan A. A. (2026). Technological aspects of integrating a cadastral information model into the Unified State Register of Real Estate data structure. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 179–187. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-179–187

Введение

Градостроительство как научная дисциплина имеет многовековую историю развития, однако современные социально-экономические и экологические условия предъявляют к ней новые требования. Внедрение информационных технологий, основанных на методах обработки и анализа больших данных, а также необходимость обеспечения устойчивого развития городских территорий формируют комплекс задач, решение которых невозможно без использования новых методик проектирования. Существующая практика доказала свою недостаточную эффективность в условиях стремительного изменения инфраструктурных потребностей и глобальных вызовов (изменение климата, урбанизация и дефицит земельных ресурсов). В свою очередь и современное управление градостроительной деятельностью, а именно архитектурно-строительное проектирование, сталкивается с рядом вызовов, связанных с необходимостью повышения эффективности кадастровых процессов (постановка объектов недвижимости на государственный кадастровый учет (ГКУ)). Это обусловлено увеличением объема данных, которые необходимо учитывать при формировании проектной документации (а именно: схемы планировочной организации земельного участка (ПЗУ) или генеральных планов (ГП) объектов недвижимости), а также тенденциями к автоматизации и цифровизации процессов и процедур кадастрового учета.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 331 «Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства» с 1 января 2022 г. ведение операций информационного моделирования для всех проектов нового строительства и объектов капитального строительства, подлежащих реконструкции и финансируемых с привлечением средств бюджетов бюджетной системы Российской Федерации, стало обязательным. Это говорит о том, что технология информационного моделирования (ТИМ) в настоящее время стала главным направлением при разработке ИМ объекта недвижимости. Также данная техно-

логия позволяет выполнять контроль объекта недвижимости на всех этапах его жизненного цикла, включая возможность предоставления информации об объекте для внутренних и различных внешних юридических структур, в том числе предоставление сведений для осуществления ГКУ объекта недвижимости.

Так, применение ТИМ позволяет предельно упростить адаптировать процесс получения, предоставления, хранения и применения информации об объекте недвижимости к новым условиям, а также дает возможность существенно упростить обмен данными внутри проекта (например, между отделами проектной организации), а также между различными внешними проектами и структурами (например, предоставление данных для кадастровых целей в ЕГРН). То есть использование ТИМ позволяет повысить качество, производительность и точность предоставляемой информации об объекте недвижимости в рамках всех этапов его жизненного цикла, а также сократить сроки обработки и предоставления информации об этом объекте для конкретных целей. В соответствии с этим применение ТИМ подразумевает разработку информационной модели, которая в соответствии с ГОСТ Р 58439.1–2019 является «совокупностью структурированных и неструктурированных информационных контейнеров, представляющих собой единый достоверный источник информации по проекту (активу) на всех или отдельных стадиях его жизненного цикла». Так, информационная модель объекта недвижимости консолидирует всю информацию об объекте в единой цифровой среде (специализированной программе) в виде геометрической модели с наполнением ее определенными данными, а также обеспечивает доступ к этим данным всем заинтересованным лицам (как физическим, так и юридическим) на всех этапах его жизненного цикла, от момента формирования эскизного проекта (общих технологических решений) и проектирования до этапа осуществления строительства с последующей его эксплуатацией и дальнейшим сносом.

Особого внимания в рамках данной научной работы заслуживает процесс внедрения сведений об объекте недвижимости на основе ТИМ в ЕГРН. Однако к настоящему времени не существует нормативно закрепленной методики интеграции сведений из информационной модели объекта недвижимости в структуру данных ЕГРН, но различными учеными активно ведутся научные исследования по данному направлению.

Анализируя существующий научный опыт в области BIM-технологий (ТИМ) в России, заслуживают внимания труды одного из ведущих ученых и экспертов данного направления – В. В. Талапова (президента Сибирской БИМ-Академии, член-корреспондента МААМ). Он является автором многочисленных публикаций по теме BIM/ТИМ [1] и популярных учебников [2], также ученый координирует и контролирует процессы по внедрению и продвижению BIM/ТИМ в архитектурно-строительные и кадастровые предприятия России и Казахстана.

В работе [3] В. В. Талапов предложил общую схему информационной модели недвижимости, отвечающую основным принципам ТИМ. Данная схема представлена на рис. 1.

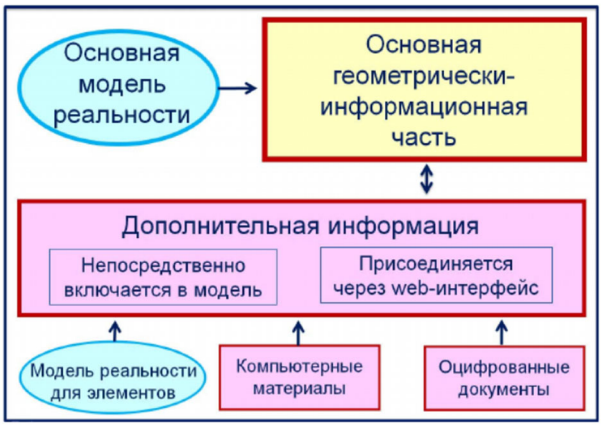


Рис. 1. Схема ИМ объекта недвижимости, предложенная В. В. Талаповым [3]

Проанализировав представленную схему, а также результаты научного исследования автора, можно сделать следующие заключения: ИМ объекта недвижимости допустима для осуществления информационного моделирования любого объекта недвижимости, что, в свою очередь, предоставляет возможность для решения кадастровых задач, в том числе таких, как интеграция сведений ИМ

объекта недвижимости в информационную структуру данных ЕГРН; информационное моделирование – это сложный и закономерный процесс, отдельные операции которого существенно отличаются друг от друга в соответствии с этапом жизненного цикла объекта недвижимости, однако решение и логический итог одной операции этого жизненного цикла является исходной информацией для начала его следующей операции; информационная модель – это не просто трехмерная модель, а комплексная система, которая объединяет в себе геометрическую и дополнительную информацию, а также различные процессы, связанные с ее жизненным циклом.

Также нельзя не отметить работу Д. А. Гуры в сфере трехмерного моделирования объектов капитального строительства в рамках контроля за процессами землепользования для осуществления актуализации информации, которая хранится в государственных структурах и системах. В одной из своих работ [4] Д. А. Гура выделил пять ключевых методологических принципов для трехмерной идентификации объектов недвижимости, позволяющих актуализировать, обновлять, проверять и систематизировать пространственную кадастровую информацию. Теоретически автор обосновал каждый из принципов и определил их значение для поэтапного перехода от 2D- к 3D-кадастру. Д. А. Гура в ходе своего исследования предложил концептуальную структуру, включающую пять методологических принципов, связанных между собой и образующих основу для построения трехмерного кадастра недвижимых объектов. Ключевое место в этой структуре отводится принципу системности, который обеспечивает комплексный подход к кадастровому учету: пространственные, атрибутивные и юридические характеристики объектов объединяются в рамках общей информационной модели.

Особого внимания заслуживают научные исследования А. П. Карпика, посвященные развитию темы моделирования геопространства городских территорий [5]. В своих трудах он обосновал ряд концептуальных положений, относящихся к информационному геодезическому сопровождению устойчивого развития территорий. Автором было дано определение геоинформационного пространства как информационно скоординированной компьютерной обобщающей модели местности. А. П. Карпик разработал модели структурно-функционального и информационного типа для геодезического информационного обеспечения, а также предложил внедрять его в качестве геодезической пространственной информационной системы, что, в свою очередь, имеет особое значение для формирования исходных данных для целей проектирования объектов капитального строительства.

Работа Д. Н. Ветошкина посвящена исследованию возможностей реализации концепции «умного города» и развития 3D-кадастра как ключевого инструмента управления городской средой. Одной из целей научного исследования автора является оценка и формулирование практических рекомендаций по нормативно-правовой базе для реализации концепций «умного города» и 3D-кадастра, с акцентом на принципах устойчивого развития и интеграции современных технологий [6].

В работе А. С. Несипбаева и В. Н. Москвина «Связь технологии информационного моделирования и кадастрового учета при работе с объектами капитального строительства» рассматривается организация такого взаимодействия, которое позволяет участникам инвестиционно-строительного проекта, использующим ТИМ, обмениваться данными с ЕГРН, а также получать сведения из ЕГРН для формирования и пополнения информационной модели объекта капитального строительства (ОКС). Кроме того, авторы вводят понятие «кадастровый контейнер» (на основе ГОСТ Р 58439.1–2019) для информационной модели ОКС, куда включается вся кадастровая информация об объекте, которая формируется в итоговой информационной модели ОКС. В этой же работе формулируются определенные требования к «кадастровому контейнеру», что, по мнению исследователей, способствует унификации процессов информационного моделирования и сбора кадастровых данных по ОКС [7].

Л. В. Нечунаева, А. В. Ершов и А. В. Чернов рассматривают применение BIM-технологий в земельно-имущественных отно-

шениях, отмечая, что внедрение информационного моделирования в строительстве, кадастровой и землеустроительной деятельности откроет новые горизонты для повышения эффективности управления объектами недвижимости [8].

Однако, проанализировав научные исследования современных ученых в сфере ТИМ для целей кадастра [1–8] и актуальную нормативно-техническую литературу (ПП РФ №331, СП 333.1325800.2020, ФЗ № 218 и др.), можно сделать вывод о том, что на данный момент не описана технология представления и интеграции сведений ИМ объекта недвижимости в структуру данных ЕГРН, что в свою очередь, служит подтверждением обоснованности научной работы, представленной в настоящей статье. Исходя из этого, задача данного исследования состоит в создании укрупненной технологической схемы, позволяющей интегрировать данные информационной модели объекта недвижимости в структуру данных ЕГРН.

Методы и материалы

Рассматривая жизненный цикл объекта недвижимости, можно выделить несколько его основных этапов (операций) в рамках одного общего технологического процесса. Рассмотрим укрупненно технологический процесс жизненного цикла объекта недвижимости в виде ленточного (последовательного) списка операций (рис. 2).

Рис. 2. Жизненный цикл объекта недвижимости

Каждая отдельная операция технологического процесса жизненного цикла объекта недвижимости, представленная на рис. 1, заслуживает особого внимания, так как включает в себя ряд последовательных шагов, необходимых для выполнения данной операции. Однако в рамках данного научного исследования рассмотрены следующие этапы жизненного цикла объекта недвижимости: подготовка проектной документации (которая входит в состав технического плана; на основе этого плана данные об объекте недвижимости заносятся в ЕГРН), осуществление государственного кадастрового учета (ГКУ) объекта, а также его ввод в эксплуатацию, так как эти процессы влияют на содержание сведений об объекте недвижимости в информационную структуру данных ЕГРН, поскольку они включаются в состав технического плана, на основании которого осуществляется ГКУ и государственная регистрация права (ГРП) объектов недвижимости. В составе технического плана, в свою очередь, должны быть представлены следующие документы – разрешение на строительство объекта недвижимости и проектная документация, прошедшая соответствующую экспертизу.

В соответствии с ПП РФ № 87 «О составе разделов проектной документации», а также согласно приказу Росреестра от 15.03.2022 № П/0082 «Об установлении формы технического плана» в исследовании [9] авторами было выполнено упорядочивание (формализация) состава проектной документации и на основе этого сформулировано заключение, что для подготовки технического плана требуются такие разделы проектной документации, как пояснительная записка (ПЗ), схема планировочной организации земельного участка, архитектурные решения, конструктивные решения.

Перечисленные разделы ПД содержат текстовые и графические материалы, содержащие архитектурные, функционально-технологические, конструктивные и инженерно-технические решения, предназначенные для обеспечения строительства объекта недвижимости. Также в разделы ПД включены данные о местоположении и возведении объекта капитального строительства, а также сопутству-

ющей инфраструктуры в границах одного или нескольких земельных участков, прошедших процедуру государственного кадастрового учета.

Особого внимания заслуживает раздел проектной документации «Схема планировочной организации земельного участка», так как в рамках данного раздела аккумулируется сводная информация о планировочном решении проектируемого объекта недвижимости (информация из разделов АР и КР) при размещении его в границах земельного участка. Также в разделе ПЗУ представлены сведения по технологическому обоснованию объекта, выполнено описание санитарных и градостроительных норм и регламентов и отображены данные по подключению объекта проектирования к существующим сетям инженерно-технического обеспечения. Перечисленная информация по разделу ПЗУ комплектуется на основании исходных данных и данных смежных разделов проектной документации. На основе практического опыта по формированию проектной документации в части раздела ПЗУ [10], а также с учетом методических рекомендаций по формированию информационной модели недвижимого объекта, направляемой на экспертизу в ФАУ «Главгосэкспертиза России» в рамках проведения государственной экспертизы проектной документации и оценки информационной модели объекта капитального строительства от 06.04.2021 № 01-01-17/4620-НБ, исходные данные для подготовки проектной документации возможно представлять как в 2D-, так и в 3D-форматах. Следовательно, раздел ПЗУ может быть оформлен в виде информационной модели, если это предусмотрено техническим заданием. В соответствии с ним исходные данные, необходимые для выполнения проектных работ в полном объеме, должны быть предоставлены в трехмерном формате.

По завершении процесса формирования проектной документации раздел ПЗУ укомплектовывается текстовой и графической частями, в которых отражены все данные об объекте.

С использованием данных, приведенных в Постановлении Правительства РФ от 16.02.2008 № 87, а также на основе информации, содержащейся в смежных разделах проектной документации, выстраивается информационная модель объекта недвижимости. При создании данной информационной модели формируется геометрически-информационная модель, которая выступает в качестве непосредственного хранилища определенной геометрической, схематической и прочей информации об объекте [3].

Геометрически-информационная составляющая служит главным хранилищем («контейнером») модели, заполняемым данными как напрямую, так и через прикрепленные ссылки, в результате чего формируется схематическая геометрия объекта – то, что мы привыкли называть информационной моделью объекта недвижимости (геометрической моделью).

Затем информационная модель наполняется дополнительной информацией, которая также непосредственно включается в модель или прикрепляется к ней (или ее элементу) ссылками на определенное место ее генерации или хранения данной информации. Так, информационная модель комплектуется слоями информации об объекте недвижимости, которые образуют библиотеку слоев и содержат в себе данные в виде векторных элементов и дополнительных файлов. В том числе формируется слой с кадастровой информацией, содержащий в себе основные и дополнительные сведения (по кадастру недвижимости) об объекте недвижимости. Например, к основным сведениям относится следующая информация об объекте: вид объекта недвижимости, описание его местоположения, площадь земельного участка, кадастровый номер земельного участка и кадастрового квартала и т. д. К дополнительным сведениям об объекте можно отнести такие характеристики, как вид разрешенного использования земельного участка, категория земель, к которой отнесен участок, сведения о зонах особого использования территории, расположенных в границах земельного участка, назначение здания, помещения, сооружения и т. д.

Так, основные и дополнительные сведения об объекте недвижимости могут храниться в виде элементов внутри информационной модели, непосредственно формируя и

описывая сам объект недвижимости, или в виде внешних файлов в доступном формате для связи данных с информационной моделью, образуя слой с кадастровой информацией. Данный «слой» кадастровых сведений является основой для разработки разделов технического плана объекта недвижимости, именно эти сведения интегрируются в сам документ.

Технический план, в свою очередь, разрабатывается в соответствии с Федеральным законом от 13.07.2015 N 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости». Так, основанием для разработки технического плана являются разрешение на строительство и проектная документация на объект недвижимости. В соответствии с этим наполнение технического плана происходит, в частности, по результатам проектной документации, информация которой полностью дублируется в информационной модели данного объекта недвижимости в виде модели с кадастровым слоем сведений (рис. 3).

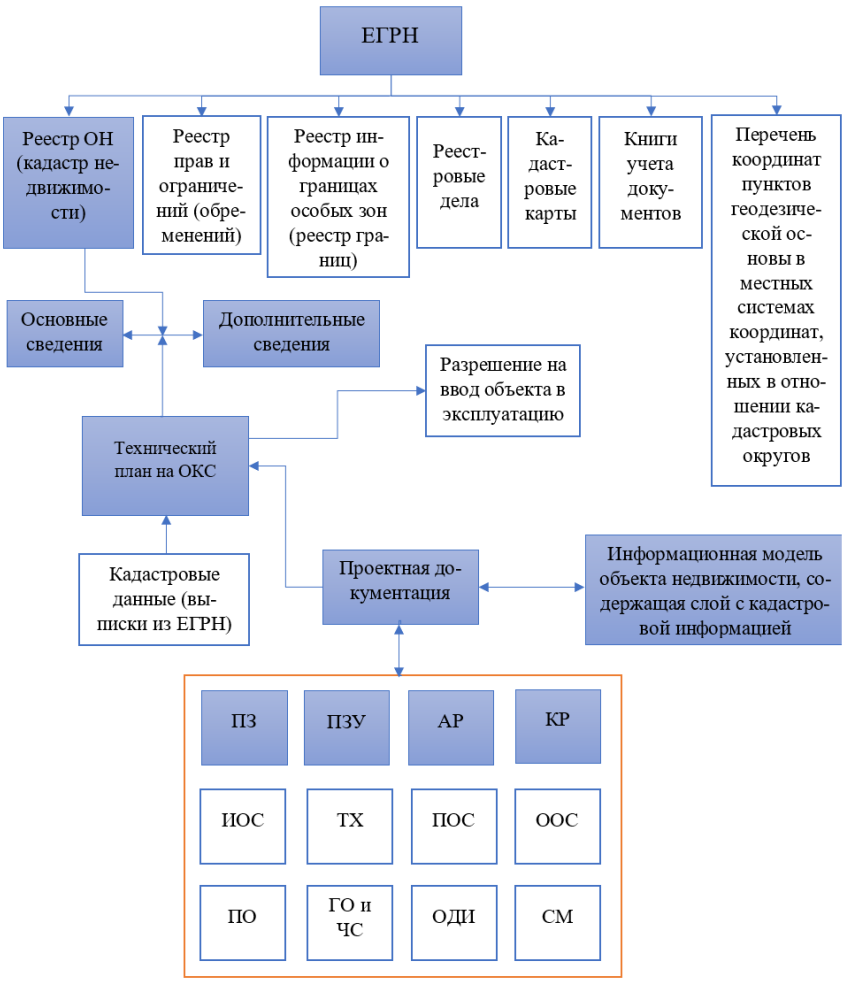


Рис. 3. Укрупненная технологическая схема интеграции информационной модели объекта недвижимости в информационную структуру данных ЕГРН

Таким образом, согласно рис. 3 осуществляется интеграция сведений об объекте недвижимости в информационную структуру данных ЕГРН через разработку и утверждение технического плана объекта недвижимости, разработанного на основе утвержденной проектной документации (прошедшей экспертизу), а также данных информационной модели объекта недвижимости. Но в настоящее время интеграция сведений из информационной модели объекта недвижимости в ЕГРН выполняется «ручным» методом – посредством ручного набора данных и заполнения советующих документов и форм. Кроме

того, выполняется плоский набор данных – это XML-схемы и графические приложения, разработанные в 2D-формате. Исходя из этого, можно заключить, что на данный момент нет технической возможности предоставлять данные из информационной модели в полном объеме и исходном формате для целей кадастра в информационную структуру ЕГРН.

Заключение

В рамках научного исследования предложена к рассмотрению укрупненная технологическая схема по интеграции сведений из информационной модели объекта недвижимости в информационную структуру данных ЕГРН.

Однако в настоящее время отсутствует техническая возможность передачи информации об объекте недвижимости в виде его информационной модели в структуру данных ЕГРН, в связи с чем интеграция сведений об объекте недвижимости из информационной модели в ЕГРН происходит на основании конвертации данных этой информационной модели (слоя с кадастровой информацией), содержащей в себе основные и дополнительные сведения об объекте недвижимости, в формат данных, доступный для ЕГРН. То есть возможность формирования кадастрового слоя в информационной модели существует, тогда как возможность полноценного представления всей этой информационной модели в ЕГРН отсутствует.

В соответствии с этим проблема представления данных об объекте недвижимости в ЕГРН в виде информационной модели актуальна. Дальнейшие исследования автора будут направлены на формализацию требований к XML-схемам технического плана, генерируемым непосредственно из среды общих данных информационной модели объекта недвижимости, для осуществления возможности прямой передачи этих данных в ЕГРН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Талапов В. В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий : учебное пособие. М. : ДМК Пресс, 2011. 392 с.
2. Талапов В. В. Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. М. : ДМК Пресс, 2015. 410 с.
3. Талапов В. В., Таныгина Е. А. Об общей схеме информационной модели объекта недвижимости. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8, № 2. С. 144–153.
4. Гура Д. А., Шевченко Г. А. Методологические принципы формирования трехмерного кадастра объектов недвижимости. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 178–191.
5. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий : монография. Новосибирск : СГГА, 2004. 260 с.
6. Ветошкин Д. Н. Разработка усовершенствованной модели земельно-информационной системы муниципального образования [Электронный ресурс]. URL: https://sgugit.ru/upload/scienceand-innovations/dissertation-councils/dissertations/vetoshkin-dmitriy-nikolaevich/Автореферат.pdf?ysclid=lpjku3pc7547402803.
7. Несипбаев А. С., Москвин В. Н. Связь технологии информационного моделирования и кадастрового учета при работе с объектами капитального строительства. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 6. С. 143–153. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-143-153.
8. Нечунаева Л. В., Ершов А. В., Чернов А. В. Возможности применения BIM-технологий в земельно-имущественных отношениях. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 7 : Международная научно-технологическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии». Новосибирск : СГУГиТ, 2022. № 1. С. 91–97.
9. Харазян А. А., Чернов А. В. Место BIM-модели генерального плана объекта недвижимости в информационной структуре Единого государственного реестра. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 6. С. 144–155. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-6-144-155.

10. Отчет об оценке применения BIM-технологий в строительстве [Электронный ресурс]. Национальное объединение изыскателей и проектировщиков (НОПРИЗ). URL: https://nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchot.pdf (дата обращения: 17.04.2026).

REFERENCES

1. Talapov, V. V. (2011). *Osnovy BIM: vvedenie v informatsionnoe modelirovanie zdaniy [BIM Basics: Introduction to Building Information Modeling].* Moscow: DMK Press. 392 p. [in Russian].

2. Talapov, V. V. (2015). *Tekhnologiya BIM: sut' i osobennosti vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy [BIM Technology: Essence and Features of Building Information Modeling Implementation].* Moscow: DMK Press. 410 p. [in Russian].

3. Talapov, V. V., Tanygina, E.A. (2018). On the general scheme of the information model of a real estate object. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Higher Educational Institutions. Investments. Construction. Real Estate.],* vol. 8, No. 2, pp. 144–153. [in Russian].

4. Gura, D. A., Shevchenko, G. A. (2020). Methodological principles of formation of a three-dimensional real estate cadastre. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* vol. 25, No. 2, pp. 178–191. [in Russian].

5. Karpik, A. P. (2004). *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy [Methodological and technological foundations of geoinformation support of territories].* Novosibirsk: SGGA. 260 p. [in Russian].

6. Vetoshkin, D. N. *Razrabotka usovershenstvovannoy modeli zemel'no-informatsionnoy sistemy munitsipal'nogo obrazovaniya [Development of an improved model of the land information system of a municipality].* Abstract of a dissertation. Retrieved from https://sgugit.ru/upload/scienceand-innovations/dissertation-councils/dissertations/vetoshkin-dmitriy-nikolaevich/Автореферат.pdf?ysclid=lpjku3pc7547402803 (accessed: 21.05.2026) [in Russian].

7. Nesipbaev, A. S., Moskvin, V. N. (2024). The relationship between building information modeling technology and cadastral registration when working with capital construction projects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* vol. 29, No. 6, pp. 143–153. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-143-153 [in Russian].

8. Nechunaeva, L. V., Ershov, A. V., Chernov, A. V. (2022). Possibilities of using BIM technologies in land and property relations. *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]* vol. 7, No. 1, pp. 91–97 [in Russian].

9. Kharazyan, A. A., Chernov, A. V. (2023). The place of the BIM model of the master plan of a real estate object in the information structure of the Unified State Register. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT],* vol. 28, No. 6, pp. 144–155. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-6-144-155 [in Russian].

10. NOPRIZ (National Association of Surveyors and Designers). Otchet ob otsenke primeneniya BIM-tekhnologiy v stroitel'stve [Report on the assessment of the application of BIM technologies in construction]. Retrieved from https://nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchot.pdf (accessed: 17.04.2026) [in Russian].

Об авторе

Анастасия Анатольевна Харазян – аспирант кафедры землеустройства и кадастров, СГУГиТ; старший преподаватель кафедры автомобильных дорог и городского кадастра, КузГТУ.

Author details

Anastasia A. Kharazyan – PhD Student, Department of Land Management and Cadastres, Siberian State University of Geosystems and Technologies; Senior Lecturer, Department of Highways and Urban Cadastre, Kuzbass State Technical University.

Получено / Received 22.04.2026
Поступила после рецензирования / Revised 17.08.2026
Принята к публикации / Accepted 10.09.2026