

ВЕСТНИК СГУГиТ

(Сибирского государственного университета геосистем и технологий)

Научный журнал

Том 31, № 4

2026

VESTNIK SSUGT

(Siberian State University of Geosystems and Technologies)

Scientific journal

Volume 31(4)

2026

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».
Подписные индексы в каталогах	«Пресса России» – 43809 Электронный каталог «Пресса России» – 43809э
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@snga.ru Тел. (383)343-12-55
Распространение	Свободная цена.

Дата выхода в свет 27.08.2026. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 20,80. Тираж 100 экз. Заказ 150.

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.

Байков Константин Станиславович – д-р биол. наук, старший научный сотрудник, СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Гиенко Геннадий Анатольевич – канд. техн. наук, профессор, университет Аляски, Анкоридж, США.

Жарников Валерий Борисович – канд. техн. наук, профессор, СГУГиТ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Златанова Сиси – PhD, профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Австралия.

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

Конечны Милан – доктор техн. наук, профессор, Университет Масарик, Брно, Чешская Республика.

Копейкин Сергей Михайлович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Университет Миссури, США.

Кравцов Юрий Васильевич – д-р биол. наук, профессор, НГПУ, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Левин Евгений Леонидович – PhD, профессор, Медицинский колледж Мехарри, США.

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

Похиленко Николай Петрович – д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, СО РАН, 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, МИГАиК, г. Москва, Российская Федерация.

Тикуннов 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.

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

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

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

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

Эпов Михаил Иванович – д-р техн. наук, академик РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Ягер Райнер Рудольф – доктор техн. наук, профессор, Университет прикладных наук, г. Карлсруэ, Германия.

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

Технический редактор журнала: Рыжова Виктория Андреевна.

Перевод на английский язык: Мусихин Игорь Александрович.

Редактор: Деханова Елена Константиновна.

Компьютерная верстка: Лесных Яна Анатольевна.

Дизайн обложки: Лесных Яна Анатольевна.

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.
Subscription indexes	"Russian Press" – 43809 Electronic catalogue "Russian Press" – 438093
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@snga.ru Phone: +7(383)343-12-55
Distribution Terms	Offered at a free-market price

Issue data 27.08.2026. Format 60 × 84 1/8.
Conv. pr. sheets 20,80. Circulation 100 copies. Order 150.

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.

Bajkov Konstantin Stanislavovich – DSc, Senior Researcher, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation.

Gienko Gennadij – PhD, Professor, University of Anchorage, USA.

Zharnikov Valery Borisovich – PhD, Professor, SSUGT, Novosibirsk, Russian Federation.

Zlatanova Sisi – PhD, Professor, University of New South Wales, Australia.

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

Konečný Milan – DSc, Professor, Masaryk University, Brno, Czech Republic.

Kopejkin Sergej Mihajlovich – DSc, Professor, University of Missouri, USA.

Kravcov Jurij Vasil'evich – DSc, Professor, NSRU, Novosibirsk, Russian Federation.

Levin Eugene – PhD, Professor, Meharry Medical College, USA.

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

Pohilenko Nikolaj Petrovich – DSc, Academician of RAS, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation.

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

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

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

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

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

Jepov Mihail Ivanovich – DSc, Academician of RAS, IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation.

Jaeger Reiner Rudolf – DSc, Professor, University of Applied Science, Karlsruhe, Germany.

EDITORIAL STAFF:

Technical editor: Ryzhova Victoria Andreevna.

English language translation: Musikhin Igor Aleksandrovich.

Editor: Dekhanova Elena Konstantinovna.

Computer Layout: Lesnykh Iana Anatolyevna.

Cover Design: Lesnykh Iana Anatolyevna.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

<i>Искаков Д. М., Алтынцев М. А.</i> Контроль качества совмещения облаков точек наземного лазерного сканирования и наземной стереофотограмметрической съемки.....	8
<i>Макаров С. О., Тихонов А. Д.</i> Применение усовершенствованной методики создания геодезических сетей с использованием метода PPP при построении ВГС	19
<i>Хушит Н. И., Брынть М. Я., Гура Д. А., Саввиди К. Л.</i> Создание предварительного проекта лазерного сканирования на основе синтетического облака точек, полученного методом виртуального (имитационного) лазерного сканирования	27
<i>Шоломицкий А. А., Косарев Н. С., Ахмедов Б. Н.</i> О возможности индивидуальной калибровки лазерных дальномеров электронных тахеометров	37

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

<i>Илларионова Л. В., Степанов А. С., Дубровин К. Н., Фомина Е. А.</i> Аппроксимация временных рядов NDVI сплайнами и рядом Фурье для мультисенсорной классификации пахотных земель Хабаровского края	46
<i>Филиппов Д. В.</i> Возможности применения цифровых двойников местности для исследования растительного покрова в сельском хозяйстве	56

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

<i>Бешенцев А. Н., Борисова Т. А.</i> Картографирование наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР (на примере р. Баргузин, бассейн оз. Байкал)	66
<i>Бурмин Л. Н.</i> Способ 3D-визуализации горного отвода на основе дискретной воксельной модели для анализа пространственных процессов	75
<i>Молокина Т. С.</i> Основные принципы выполнения картографической визуализации и критерии их реализации	84
<i>Сазонов В. С., Соловицкий А. Н.</i> Методика учета влияния графической точности цифровых карт при подсчете запасов угольного месторождения	94
<i>Фисич Б. А.</i> Пути совершенствования средств и методов динамического отображения процессов в геопространстве для решения специальных задач	101
<i>Чигридов С. А., Кулик Е. Н.</i> Использование принципов локальных климатических зон мегаполиса для оптимизации сети мониторинга атмосферного воздуха	108

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

<i>Гилёва Л. Н., Долматова О. Н., Подрядчикова Е. Д.</i> Методика создания геоинформационных баз данных для ведения государственного мониторинга водных объектов	119
<i>Кошель А. К., Лелюхина А. М.</i> Оценочное зонирование земель ООПТ на основе характеристик почв для повышения точности кадастровой стоимости	128
<i>Портнов А. М.</i> Методология координатного описания линейно-протяженных объектов недвижимости	137
<i>Федорчук А. С., Дубровский А. В.</i> Методическое обеспечение расчета инвестиционной привлекательности проектов по освоению земельных ресурсов на примере территории города Новосибирска	149
<i>Шаби Яби Абиойе Силванус, Сизов А. П.</i> Современное состояние земельных отношений, землеустройства и кадастра в Республике Бенин	161
<i>Ямилова А. К., Губаницева М. А., Аврунев Е. И., Ознамец В. В.</i> Информационная модель установления границ зон с особыми условиями использования территорий	170

Volume 31(3), 2026

CONTENTS

GEODESY AND MINING SURVEYING

<i>Iskakov D. M., Altyntsev M. A.</i> Comparative assessment of point cloud registration from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry	8
<i>Makarov S. O., Tikhonov A. D.</i> Optimized methodology for establishing high-precision geodetic control networks using precise point positioning	19
<i>Khusht N. I., Bryn M. Ya., Gura D. A., Savvidi K. L.</i> Methodology for preliminary laser scanning project design using synthetic point clouds from virtual scan simulation	27
<i>Sholomitskii A. A., Kosarev N. S., Akhmedov B. N.</i> Methodology for individual calibration of EDM modules in electronic total stations	37

REMOTE SENSING OF THE EARTH AND PHOTOGRAMMETRY

<i>Illarionova L. V., Stepanov A. S., Dubrovin K. N., Fomina E. A.</i> Spline and Fourier-based approximation of NDVI time series for multisensor cropland classification in Khabarovsk Krai	46
<i>Filippov D. V.</i> Application of digital terrain twins for vegetation analysis in agriculture	56

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

<i>Beshentsev A. N., Borisova T. A.</i> Flood mapping based on geomorphometric analysis of a digital elevation model: a case study of the Barguzin River basin, Lake Baikal	66
<i>Burmin L. N.</i> 3D visualization method of a mining lease based on a discrete voxel model for analysis of spatial processes	75
<i>Molokina T. S.</i> Core principles of cartographic visualization and criteria for their implementation	84
<i>Sazonov V. S., Solovitskiy A. N.</i> Assessing the impact of digital map graphical accuracy on coal reserve estimation: a methodological approach	94
<i>Fisich B. A.</i> 3 Improving dynamic visualization of geospatial processes: tools and methods for specialized tasks	101
<i>Chigrinov S. A., Kulik E. N.</i> Integrating local climate zones into air quality network design for megacities	108

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

<i>Gileva L. N., Dolmatova O. N., Podryadchikova E. D.</i> A methodology for developing geo-spatial databases to support state monitoring of water bodies	119
<i>Koshel A. K., Lelyukhina A. M.</i> Evaluative zoning of specially protected natural area lands based on soil characteristics for improved cadastral valuation	128
<i>Portnov A. M.</i> A methodology for the coordinate-based description of linear real estate features	137
<i>Fedorchuk A. S., Dubrovsky A. V.</i> Methodological framework for assessing the investment attractiveness of land-development projects: a case study of Novosibirsk	149
<i>Chabi Yabi Abioye Sylvanus, Sizov A. P.</i> Land relations, land management, and cadastral practice in the Republic of Benin: a contemporary review	161
<i>Yamilova A. K., Gubanishcheva M. A., Avrunev E. I., Oznamets V. V.</i> An information model for establishing boundaries of zones with special land use conditions	170



Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.721.222:528.71

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-8-18>

Контроль качества совмещения облаков точек наземного лазерного сканирования и наземной стереофотограмметрической съемки

Д. М. Искаков^{1✉}, М. А. Алтынцев¹

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

e-mail: d1skakov@yandex.ru

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ методов С2С, С2М и М3С2 для контроля качества совмещения облаков точек, полученных с помощью наземного лазерного сканирования (НЛС) и наземной стереофотограмметрической съемки (НФС). Описаны теоретические основы методов и рассмотрен единый подход к подготовке данных для сравнения результатов их применения, включающий уравнивание в общей системе координат, фильтрацию шумов и артефактов, нормализацию плотности и выделение зоны взаимного перекрытия. На примере экспериментальных данных сформированы поля расстояний для каждого метода и рассчитан единый набор статистических показателей минимум, максимум, среднее арифметическое (μ), медиана (Me), среднеквадратичное значение (СКЗ), среднеквадратическое отклонение (СКО) и 95-й процентиль ($P95$), а также выполнен анализ распределений расстояний по гистограммам. Показано, что С2С и С2М обеспечивают близкие оценки типичных расхождений в зоне перекрытия и удобны для оперативного количественного контроля, тогда как М3С2 предоставляет физически интерпретируемую оценку смещения вдоль локальной нормали и позволяет выявлять систематические компоненты, но требует более тщательной параметризации и анализа проблемных зон.

Ключевые слова: облако точек, наземное лазерное сканирование, наземная стереофотограмметрическая съемка, С2С, С2М, М3С2, контроль качества

Для цитирования:

Искаков Д. М., Алтынцев М. А. Контроль качества совмещения облаков точек наземного лазерного сканирования и наземной стереофотограмметрической съемки. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 8–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-8-18>

Comparative assessment of point cloud registration from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry

D. M. Iskakov^{1✉}, M. A. Altyntsev¹

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

e-mail: d1skakov@yandex.ru

Abstract. The study provides a comparative assessment of the C2C, C2M, and M3C2 methods for quality control of point cloud co-registration derived from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry. The theoretical basis of each method is outlined, and a unified preprocessing workflow is proposed for the comparison of their outputs, comprising transformation to a common coordinate system, removal of noise and artifacts, density normalization, and delineation of the mutual overlap zone. Experimental data were used to generate distance fields for each method and to compute a common set of descriptive statistics (Min, Max, Mean (μ), Median (Me), STD, RMS, and $P95$) together with histogram-based analysis of distance distributions. The results indicate that C2C and C2M yield closely comparable estimates of typical discrepancies within the overlap area and are well suited for rapid quantitative quality assessment, whereas M3C2 provides a physically interpretable estimate of displacement along the local surface normal and enables the detection of systematic offsets, albeit with greater sensitivity to parameterization and local data quality issues.

Keywords: point cloud, terrestrial laser scanning, terrestrial stereophotogrammetry, C2C, C2M, M3C2, quality control

For citation:

Iskakov D. M., Altyntsev M. A. (2026). Comparative assessment of point cloud registration from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 8–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-8-18>

Введение

Совместное применение разнородных облаков точек в задачах обследования и цифровизации объектов строительства и промышленной инфраструктуры обусловлено необходимостью получения детальных геометрических характеристик таких объектов [1, 2]. Наземное лазерное сканирование обеспечивает высокую точность и стабильность геометрических измерений, однако на реальных объектах нередко формирует теневые зоны вследствие окклюзий и ограничений по размещению станций. Наземная стереофотограмметрическая съемка позволяет компенсировать теневые зоны и повысить полноту модели, но характеризуется неоднородной плотностью и точностью точек, зависящей от текстуры, освещенности и параметров обработки [3, 4].

При совмещении НЛС и НФС для построения ТИМ-моделей ключевым этапом становится количественная оценка расхождений между разнородными облаками и валидация корректности интеграции. Такая оценка зависит от выбора метрики сравнения.

Выбор метрики сравнения определяет достоверность вывода о качестве совмещения и допустимости применения объединенного облака в дальнейших инженерных задачах [5].

Наиболее распространенными подходами к оценке отклонений являются методы вычисления расстояний Cloud-to-Cloud (C2C),

Cloud-to-Mesh/Model (C2M) и Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) [6, 7]. При одинаковом типе результата (поле расстояний) они различаются математической постановкой, чувствительностью к неоднородной дискретизации и шероховатости, а также интерпретируемостью оценок [8]. В условиях интеграции НЛС-НФС это критично: НЛС выступает опорным по точности, тогда как НФС дополняет геометрию, но может содержать локальные реконструктивные искажения.

Целью статьи является анализ точности совмещения облаков точек НЛС и НФС по зонам взаимного перекрытия с последующей выработкой практических рекомендаций по выбору оптимального метода вычисления расстояний или их сочетания при решении задач контроля качества результатов интеграции разнородных данных.

Задачи статьи:

- рассмотреть единый подход к подготовке данных НЛС и НФС для сравнения результатов применения методов C2C, C2M и M3C2 (фильтрация, прореживание, уравнивание, выбор зон сравнения);
- рассмотреть теоретические основы и принцип работы методов C2C, C2M и M3C2 в контексте сравнения облаков точек;
- выполнить анализ точности совмещения облаков НЛС и НФС методами C2C, C2M и M3C2, применяя набор статистических показателей (минимум, максимум, среднее

арифметическое (μ), медиана (Me), средне-квадратичное значение (СКЗ), среднеквадратическое отклонение (СКО) и 95-й процентиль ($P95$));

– проанализировать форму распределений и интерпретационные возможности результатов (выявление локальных артефактов, краевых эффектов перекрытия, признаков систематического смещения по нормали);

– сопоставить результаты трех методов и сформулировать практические рекомендации по выбору метода в задачах контроля качества интеграции НЛС-НФС и дальнейшего использования данных при построении/верификации ТИМ-модели.

Методы и материалы

Единый подход к подготовке данных НЛС и NFS с целью дальнейшего контроля качества совмещения разнородных облаков точек включает последовательное выполнение четырех процедур [9].

Во-первых, выполняется уравнивание облаков в единой системе координат, так как остаточные систематические смещения (сдвиг, поворот) напрямую искажают поле расстояний. На этом этапе фиксируют опорное облако (обычно НЛС) и обеспечивают достаточное перекрытие участков сравнения [10–12].

Во-вторых, проводят фильтрацию для удаления выбросов, шумов, динамических объектов и фотограмметрических артефактов (двойные поверхности, деформация формы), чтобы исключить вклад явно ошибочных измерений в статистику [3, 4].

В-третьих, при необходимости выполняют нормализацию плотности (прореживание) по единому правилу (например, сетка с шагом s), снижая влияние сверхплотных зон и обеспечивая сопоставимость статистик НЛС и NFS [2, 3].

В-четвертых, задают зоны сравнения: основную оценку проводят в зоне взаимного перекрытия, а области без перекрытия, границы видимости, окклюзии и участки резких переходов геометрии выделяют отдельно или исключают маской, поскольку там расстояния отражают дефицит данных, а не реальное расхождение [13, 14].

Такая схема подготовки предусматривает, что различия в результатах C2C, C2M и M3C2

обусловлены преимущественно особенностями самих методов вычисления расстояний, а не эффектами регистрации, шума или неоднородной плотности.

Метод C2C основан на принципе ближайшего соседа и задает расстояние от каждой точки сравниваемого облака до ближайшей точки опорного облака (рис. 1).

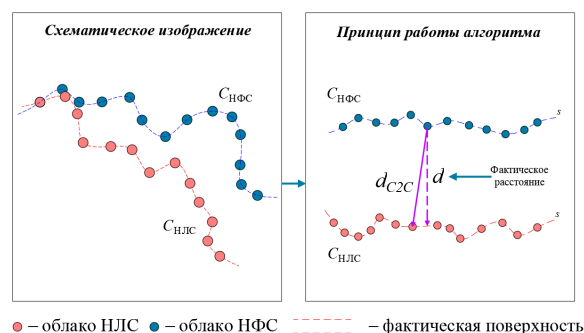


Рис. 1. Принцип вычисления расстояний методом C2C

Для точки q_k^{NFS} расстояние определяется как минимальная евклидова норма:

$$d_{C2C}(q_k^{NFS}) = \min_j \|q_k^{NFS} - q_j^{NLS}\|, \quad (1)$$

где q_j^{NLS} – точки опорного облака НЛС;
 q_k^{NFS} – точка облака NFS.

Таким образом формируется скалярное поле $\{d_{C2C}(q_k^{NFS})\}$ на точках облака C_{NFS} , отражающее локальную близость двух дискретных выборок. Следует учитывать, что при существенных различиях плотности точек и наличии зон неполного перекрытия C2C может фиксировать не только геометрическое расхождение поверхностей, но и дискретизационные эффекты (удаленность ближайшего соседа вследствие прореживания или отсутствия данных) [3, 6, 14].

Метод C2M рассматривает сравнение как задачу «точка – поверхность», где опорная геометрия задана Mesh поверхностью M_{NLS} , аппроксимирующей поверхность объекта C_{NLS} , а $T_m \in M_{NLS}$ – ее треугольники (рис. 2).

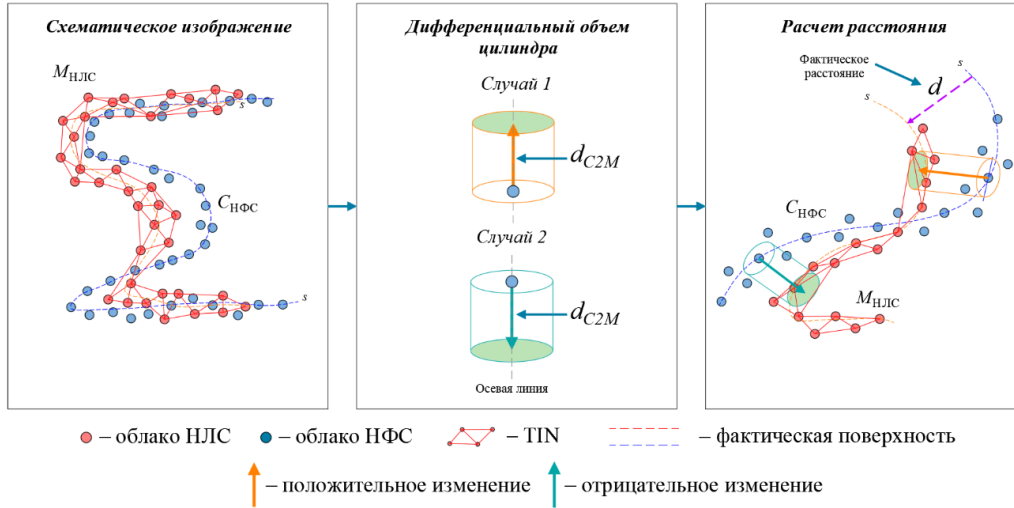


Рис. 2. Принцип вычисления расстояний методом C2M

Расстояние до поверхности определяется как минимум расстояний до всех треугольников:

$$d_{C2M}(q_k^{HFC}) = \min_{T_m \in M_{HLC}} \text{dist}(q_k^{HFC}, T_m), \quad (2)$$

где $\text{dist}(q_k^{HFC}, T_m)$ – кратчайшее расстояние от точки q_k^{HFC} до треугольника T_m (проекция на плоскость треугольника с учетом попадания внутрь треугольника; иначе – до ближайшего ребра/вершины) [15].

Метод МЗС2 относится к современным подходам сравнения облаков точек и вычисляет расстояния вдоль локальной нормали к поверхности опорного облака, что повышает корректность интерпретации смещений на

криволинейных и наклонных участках [7]. Принцип вычисления расстояний методом МЗС2 представлен на рис. 3.

Метод МЗС2 рассчитывает расстояния между облаками вдоль локальной нормали к поверхности, что особенно важно для сложных криволинейных элементов. В рамках методики облако НЛС выбирается в качестве опорного. Для каждой опорной точки p_i облака НЛС определяется локальная нормаль n_i :

$$z_{j,HLC} = (q_j^{HLC} - p_i) n_i; \quad (3)$$

$$z_{k,HFC} = (q_k^{HFC} - p_i) n_i. \quad (4)$$

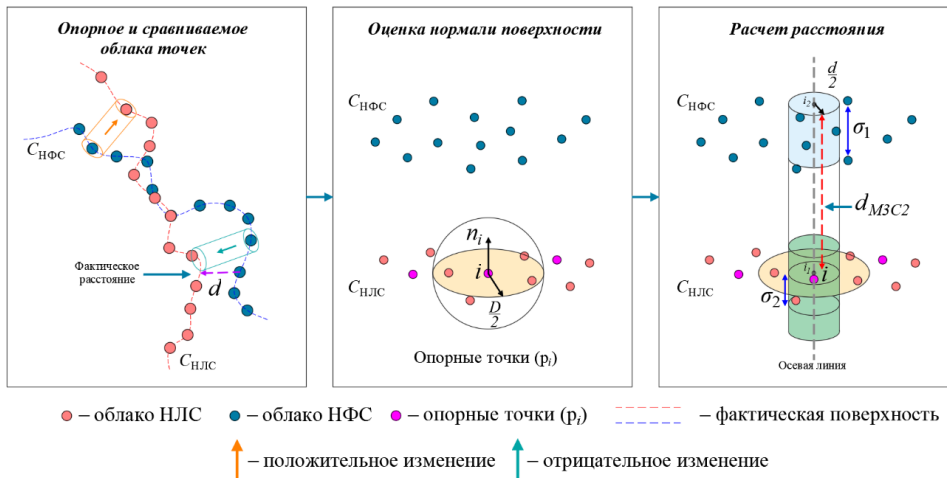


Рис. 3. Принцип вычисления расстояний методом МЗС2

Далее точки обоих облаков в цилиндрической окрестности проецируются на эту нормаль:

$$\bar{z}_{НЛС} = \frac{1}{N_{НЛС}} \sum_{j=1}^{N_{НЛС}} z_{j, НЛС}; \quad (5)$$

$$\bar{z}_{НФС} = \frac{1}{N_{НФС}} \sum_{k=1}^{N_{НФС}} z_{k, НФС}. \quad (6)$$

Смещение вдоль нормали между облаками в точке p_i определяется как

$$d_{МЗС2}(p_i) = \bar{z}_{НЛС} - \bar{z}_{НФС}, \quad (7)$$

где p_i – координаты опорной точки облака НЛС; $q_j^{НЛС}$, $q_k^{НФС}$ – точки опорного и сравниваемого облаков, попавшие в цилиндр вокруг p_i ; n_i – единичная локальная нормаль к поверхности, полученная по точкам опорного облака в сфере радиусом r ; $N_{НЛС}$, $N_{НФС}$ – число точек каждого облака в цилиндре; $d_{МЗС2}(p_i)$ – смещение вдоль нормали, $|d_{МЗС2}|$ характеризует модуль геометрического отклонения поверхностей) [7].

С целью анализа точности совмещения разнородных облаков точек, выполненного с помощью методов С2С, С2М и МЗС2, расчет выполнялся по единой выборке точек в зоне взаимного перекрытия облаков, что исключает влияние неперекрывающихся областей и краевых эффектов видимости на сводные показатели [5, 13, 14]. Для каждого метода $m \in \{С2С, С2М, МЗС2\}$ формировался набор расстояний $\{d_m(p_i)\}_{i=1}^N$, где p_i – точки выбранной области анализа, N – число точек, отобранных в зоне взаимного перекрытия облаков.

Расчет статистических показателей (μ/Me , СКО, СКЗ, $P95$,):

$$\mu_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_m(p_i); \quad (8)$$

$$Me_m = Q_{0.50}(\{d_m(p_i)\}_{i=1}^N); \quad (9)$$

$$P95_m = \left| Q_{0.95}(\{d_m(p_i)\}_{i=1}^N) \right|; \quad (10)$$

$$CKO_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_m(p_i) - \mu_m)^2}; \quad (11)$$

$$СКЗ_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_m(p_i)^2}. \quad (12)$$

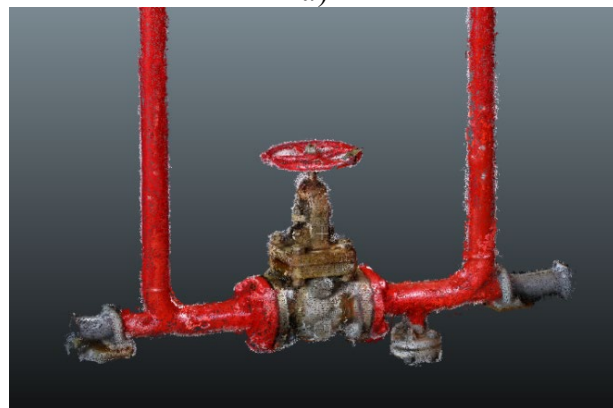
Такой набор метрик позволяет корректно сравнивать методы по центральным тенденциям (μ/Me), разбросу (СКЗ/СКО) и «хвостам» нормального распределения ($P95$ /максимум/минимум), не смешивая геометрические эффекты с зонами отсутствия данных [5, 13, 14].

Результаты

В ходе производственных работ получены исходные пространственные данные в виде облаков точек НЛС и НФС, обработанные и совмещенные по единой методике. На рис. 4 показаны исходные облака НЛС и НФС, иллюстрирующие различия в плотности, заполнении теневых зон и локальной детальности поверхностей.



а)



б)

Рис. 4. Облако точек: а) НЛС; б) НФС

После приведения данных к единой системе координат и унифицированной подготовки рассчитаны поля расстояний тремя методами: С2С, С2М и МЗС2.

Результаты С2С приведены на рис. 5 (карта отклонений) и рис. 6 (гистограмма). Дополнительно на рис. 5 и 7 представлены информационные метки выбранных точек, в которых отображаются локальные значения отклонений, координаты точек (X , Y , Z), компоненты нормали (N_x , N_y , N_z) и цветовые характеристики (R , G , B). Метод обеспечивает первичную оценку локальной близости облаков НЛС и НФС и позволяет быстро выявлять зоны повышенных расхождений [6, 14]. При интерпретации важно учитывать его чувствительность к неоднородной плотности и неполному перекрытию: рост расстояний типичен у границ видимости, на тонких/ребристых элементах и в зонах разрежения одного из облаков, поэтому такие аномалии следует трактовать как комбинацию факторов, а не как однозначную деформацию поверхности.

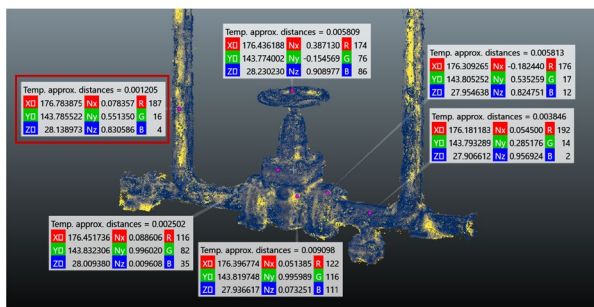


Рис. 5. Карта расстояний С2С между облаками НЛС и НФС

На рис. 5 – информационная метка выбранной точки.

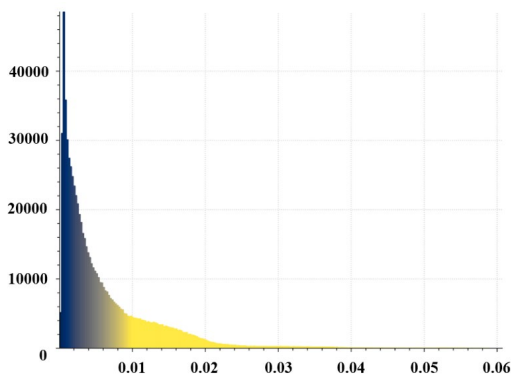


Рис. 6. Распределение расстояний С2С (гистограмма)

Гистограмма С2С характеризуется концентрацией расстояний у нуля и длинным правым хвостом: основная масса точек в зоне перекрытия хорошо согласована, а повышенные значения локальны. Хвост обусловлен особенностями ближайшего соседа и обычно связан с неоднородной плотностью, краями перекрытия, окклюзиями и сложной геометрией. Для общей оценки корректнее опираться на Me и $P95$, а максимум рассматривать как индикатор проблемных зон.

В С2М опорная геометрия задавалась Mesh, построенной по НЛС, после чего вычислялись расстояния «точка – поверхность» для облака НФС (рис. 7, а). По сравнению с С2С метод более интерпретируем, так как расстояние измеряется до непрерывной аппроксимации поверхности, однако результат зависит от качества опорной сетки: сглаживание, дефекты триангуляции и разрывы могут систематически искажать расстояния [15]. На практике наибольшие отклонения проявляются на перегибах, ребрах и в зонах, где топология сетки не соответствует реальной геометрии объекта.

Метод МЗС2 применен для вычисления расстояний между облаками вдоль локальной нормали к поверхности опорного облака НЛС. Результат представлен на рис. 7, б. В выполненной постановке параметры МЗС2 принимались: $D = 0,025898$ м, $h_{MAX} = 0,129492$ м; в качестве опорных точек использовались точки облака НЛС. Такой подход обеспечивает измерение расстояний в направлении, согласованном с локальной геометрией поверхности, что особенно важно при анализе наклонных и криволинейных элементов. При интерпретации результатов следует учитывать, что устойчивость МЗС2 определяется корректностью оценки локальных нормалей и достаточностью точек в цилиндрической окрестности: на ребрах, тонких элементах и в зонах неполного перекрытия возможны локальные артефакты/разброс значений.

Гистограммы распределения расстояний для методов С2М и МЗС2 представлены на рис. 8.

Гистограмма С2М имеет выраженный пик около нуля и хвосты в обе стороны, что указывает на хорошее согласование в зоне перекрытия при наличии локальных отклонений. Отрицательные и положительные значения отражают направление смещения относительно нормали поверхности (связано с ориентацией нормалей, локальной геометрией и качеством аппроксимации Mesh). Для общей оценки корректнее опираться на Me и $P95$ по $|d|$, а экс-

тремальные значения рассматривать как индикатор проблемных участков (ребра/тонкие элементы, локальные дефекты сетки, окклюзии).

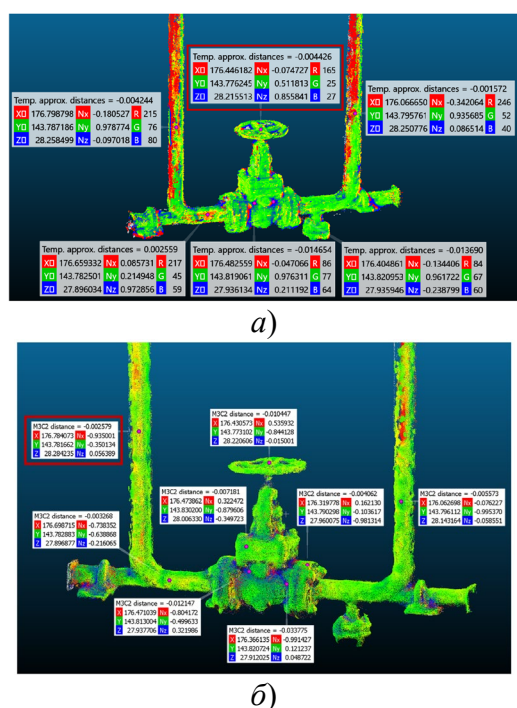


Рис. 7. Карта расстояний между облаками НЛС и НФС: а) С2М; б) М3С2; – информационная метка выбранной точки

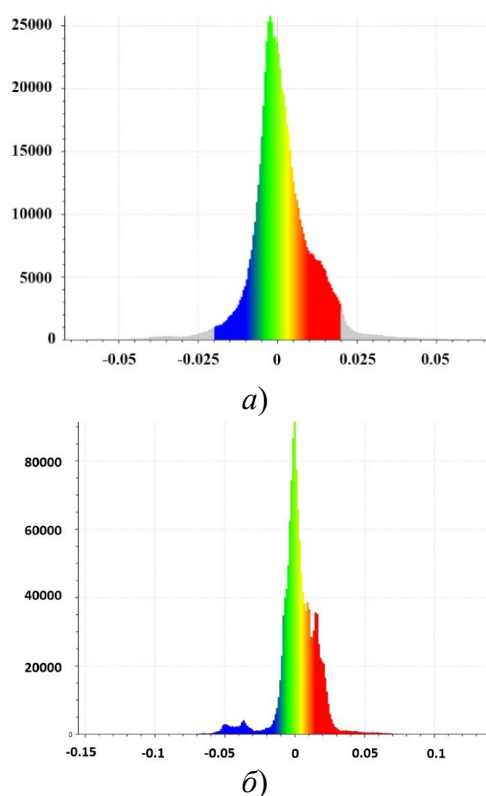


Рис. 8. Распределение расстояний С2М и М3С2: а) С2М; б) М3С2

Гистограмма М3С2 показывает выраженную концентрацию значений около нуля и наличие как положительных, так и отрицательных отклонений: в зоне перекрытия большинство точек демонстрирует небольшие смещения, а знак расстояния отражает направление расхождения вдоль локальной нормали. Расширение распределения и хвосты формируются из-за чувствительности метода к оценке нормалей и параметрам локальных окрестностей (масштаб D , диаметр проекции d , глубина), а также из-за окклюзий, ребер и тонких элементов, где нормаль и локальная выборка точек менее устойчивы [7]. Для общей оценки целесообразно использовать Me и $P95$ по $|d|$, а экстремальные значения интерпретировать как индикатор локальных проблемных зон и параметрических артефактов.

Заключение

С целью контроля качества совмещения разнородных облаков точек, выполненного по трем методам, по зонам их взаимного перекрытия был рассчитан набор статистических показателей (минимум, максимум, μ , Me , СКЗ, СКО, $P95$). Объем контрольной выборки определялся на основе анализа устойчивости статистических показателей при последовательном увеличении числа точек. По результатам сопоставления установлено, что начиная с $N=30\,402$ изменения основных метрик носят несущественный характер, что свидетельствует о стабилизации статистической оценки. Поэтому для дальнейшего сравнительного анализа была принята единая контрольная выборка объемом $N=30\,402$ точки. Для метода С2С анализировались беззнаковые расстояния, тогда как для методов С2М и М3С2 показатели (μ , Me , СКО, СКЗ) рассчитывались по знаковым расстояниям d . Гистограммы построены по полю расстояний в зоне перекрытия, а сводные метрики рассчитаны по выборке $N=30\,402$ точек из той же области. Сводные значения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сводные статистические показатели расстояний для методов С2С, С2М и М3С2

Метод	<i>N</i>	Мин., м	Макс., м	μ , м	<i>Me</i> , м	СКО, м	СКЗ, м	<i>P</i> 95, м
С2С	30402	0,000	0,035	0,004	0,002	0,004	0,005	0,012
С2М	30402	-0,034	0,039	0,001	0,001	0,003	0,003	0,004
М3С2	30376	-0,020	0,019	0,000	0,000	0,005	0,005	0,009

*Примечание – для метода М3С2 в столбце *N* указано число валидных опорных точек, по которым фактически были получены значения расстояний.

Анализ сводных статистических показателей демонстрирует, что для С2С распределение расстояний имеет выраженную концентрацию около нуля и правосторонний хвост: $\mu = 0,004$ м и *Me* = 0,002 м соответствуют типичным расхождениям порядка 2–4 мм, тогда как *P*95 = 0,012 м указывает, что 95 % точек имеют отклонения не более 12 мм; максимум = 0,035 м характеризует редкие локальные зоны повышенных расхождений, обусловленные неоднородностью плотности и особенностями ближайшего соседа на границах перекрытия, в зонах окклюзий и сложной геометрии.

Для С2М распределение имеет пик около нуля и хвосты в обе стороны, что соответствует знаковой природе расстояния относительно нормали Mesh: близость $\mu = 0,001$ м и *Me* = 0,001 м к нулю свидетельствует об отсутствии выраженного систематического смещения по нормали, при этом *P*95 = 0,004 м подтверждает, что 95 % значений по модулю не превышают 4 мм; минимум = -0,034 м и максимум = 0,039 м интерпретируются как локальные проблемные зоны (ребра, тонкие элементы, окклюзии) и участки, где качество аппроксимации поверхности или ориентация нормалей приводит к увеличению расстояний.

Для М3С2 распределение также является двусторонним, однако по величине разброса оно занимает промежуточное положение между С2С и С2М. Значения $\mu = 0,000$ м, *Me* = 0,000 м свидетельствуют об отсутствии систематического смещения вдоль нормали.

При этом СКЗ = 0,005 м и СКО = 0,005 м, а также *P*95 = 0,009 м свидетельствуют о более широком распределении по сравнению с С2М, но меньшем разбросе по сравнению с С2С. Значения минимум = -0,020 м и максимум = 0,019 м характеризуют локальные участки повышенных расхождений, что отражает чувствительность метода к устойчивости локальных нормалей, параметрам окрестностей и полноте описания сложных поверхностей.

В целом С2С и М3С2 дают сопоставимую оценку согласования (миллиметровый уровень типичных расхождений, *P*95 порядка 1 см), тогда как С2М характеризуется более компактным распределением расстояний и наименьшим разбросом. При этом М3С2 обеспечивает физически более интерпретируемое измерение вдоль локальной нормали и лучше выявляет локальные смещения, но требует более тщательного подбора параметров и отдельного анализа зон, формирующих хвосты распределения [3, 6, 7, 14–16].

В целом С2С удобен как быстрый индикатор расхождений, но чаще «раздувается» на границах перекрытия и при различной плотности; С2М стабилен на гладких участках при качественной Mesh; М3С2 лучше отражает отклонения на наклонных/криволинейных элементах, но требует аккуратной интерпретации у ребер и при дефиците точек в проекционном окне. Итоговая применимость формируется по картам отклонений, форме распределений и сводным статистикам (табл. 1); сравнительный анализ методов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ методов

Этап / задача	Метод	Контроль по метрикам/гистограмме	Интерпретация
Быстрая проверка качества совмещения НЛС и НФС	C2C	Me , $P95$, форма гистограммы	Пик у 0 – основная масса согласована; длинный хвост – локальные проблемы (края перекрытия, разная плотность, окклюзии)
Подготовка к ТИМ (сравнение с опорной поверхностью)	C2M	Me , $P95$, симметрия хвостов	Двусторонние хвосты чаще связаны с качеством Mesh (сглаживание/разрывы) плюс локальная геометрия
Выявление систематики и смещения вдоль поверхности	M3C2	μ/Me (знак), $P95$, СКЗ/СКО	Ненулевой μ/Me – возможное систематическое смещение вдоль нормалей; высокий $P95/СКЗ$ → чувствительность к нормалям/масштабам окрестности, проблемные зоны геометрии
Итоговый критерий пригодности для ТИМ	C2M + M3C2	Me , $P95$, Макс./Мин. (индикатор дефектов)	$Me/P95$ описывают обычное расхождение; Макс./Мин. почти всегда локальны и не должны влиять на общий вывод
Контроль эффективности предобработки (фильтрация/прореживание/маска)	C2C (быстро), затем C2M/M3C2	Me и $P95$	Улучшение должно проявляться прежде всего в $P95$ и форме хвоста

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139.
2. Mukupa W., Roberts G. W., Hancock C. M., Al-Manasir K. A. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. Survey Review. 2017. Vol. 49, No. 353. P. 99–116. DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.
3. Qin R., Tian J., Reinartz P. 3D change detection – approaches and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 122. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013.
4. Shafaat O. Bin. Change Detection of Urban Vegetation from Terrestrial Laser Scanning and Drone Photogrammetry: Master's Thesis. Espoo: Aalto University, School of Engineering, Department of Built Environment, 2023. 119 p.
5. Fey C., Wichmann V. Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain – handling uncertainties. Earth Surface Processes and Landforms. 2017. Vol. 42, No. 5. P. 789–802. DOI: 10.1002/esp.4022.
6. Shen Y., Lindenbergh R., Wang J. Change Analysis in Structural Laser Scanning Point Clouds: The Baseline Method. Sensors. 2017. Vol. 17, No. 1. Art. 26. DOI: 10.3390/s17010026.
7. Lague D., Brodu N., Leroux J. Multiscale model to model cloud comparison: a 3D point cloud comparison method for deformation analysis. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 82. P. 10–25. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
8. Alibekov U., Staderini V., Ramachandran G., Schneider P., Antensteiner D. Evaluation of 3D Point Cloud Distances: A Comparative Study in Multi-Point Cloud Fusion Environments. Proceedings of the 19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2024). Vol. 4: VISAPP. 2024. P. 59–71. DOI: 10.5220/0012421300003660.
9. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. Новосибирск : СГГА, 2009. 261 с.
10. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14, No. 2. P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
11. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm. Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001). 2001. P. 145–152.

12. Ahmad Fuad N., Yusoff A. R., Ismail Z., Majid Z. Comparing the Performance of Point Cloud Registration Methods for Landslide Monitoring Using Mobile Laser Scanning Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018. Vol. XLII-4/W9. P. 11–21. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.
13. Nourbakhshbeidokhti S., Kinoshita A. M., Chin A., Florsheim J. L. A Workflow to Estimate Topographic and Volumetric Changes and Errors in Channel Sedimentation after Disturbance. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Art. 586. DOI: 10.3390/rs11050586.
14. Barnhart T. B., Crosby B. T. Comparing Two Methods of Surface Change Detection on an Evolving Thermokarst Using High-Temporal-Frequency Terrestrial Laser Scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5, No. 6. P. 2813–2837. DOI: 10.3390/rs5062813.

REFERENCES

1. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). Methodology for creating digital three-dimensional models of infrastructure facilities of oil and gas production complexes using ground-based laser scanning *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, VOL 25(2), 121–139. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139 [in Russian].
2. Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. A. (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. DOI 10.1080/00396265.2015.1133039.
3. Qin, R., Tian, J., & Reinartz, P. (2016). 3D change detection—Approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 41–56. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013.
4. Shafaat, O. B. (2023). Change detection of urban vegetation from terrestrial laser scanning and drone photogrammetry. Master's thesis. Espoo: Aalto University, School of Engineering, Department of Built Environment, 119 p.
5. Fey, C., & Wichmann, V. (2017). Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain—Handling uncertainties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(5), 789–802. DOI 10.1002/esp.4022.
6. Shen, Y., Lindenbergh, R., & Wang, J. (2017). Change analysis in structural laser scanning point clouds: The baseline method. *Sensors*, 17(1), Article 26. DOI 10.3390/s17010026.
7. Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Multiscale model to model cloud comparison: A 3D point cloud comparison method for deformation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–25. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
8. Alibekov, U., Staderini, V., Ramachandran, G., Schneider, P., & Antensteiner, D. (2024). Evaluation of 3D point cloud distances: A comparative study in multi-point cloud fusion environments. In *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2024)*, Vol. 4: VISAPP (pp. 59–71). DOI 10.5220/0012421300003660.
9. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). Nazemnoe lazernoe skanirovanie: monografiya [*Terrestrial laser scanning: a monograph*]. Novosibirsk: SGGA Publ., 261 p. [in Russian].
10. Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. DOI 10.1109/34.121791.
11. Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. In *Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001)* (pp. 145–152).
12. Ahmad Fuad, N., Yusoff, A. R., Ismail, Z., & Majid, Z. (2018). Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W9, 11–21. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.

13. Nourbakhshbeidokhti, S., Kinoshita, A. M., Chin, A., & Florsheim, J. L. (2019). A workflow to estimate topographic and volumetric changes and errors in channel sedimentation after disturbance. *Remote Sensing*, 11, Article 586. DOI 10.3390/rs11050586.

14. Barnhart, T. B., & Crosby, B. T. (2013). Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*, 5(6), 2813–2837. DOI 10.3390/rs5062813.

Об авторах

Диас Мейрамович Искаков – аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Максим Александрович Алтынцев – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Authors details

Dias M. Iskakov – PhD. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Maksim A. Altyntsev – D.Sc, Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Получено / Received 17.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 16.03.2026

Принята к публикации / Accepted 17.05.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.41

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-19-26>

Применение усовершенствованной методики создания геодезических сетей с использованием метода PPP при построении ВГС

С. О. Макаров ¹✉, А. Д. Тихонов ¹

¹ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству,
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: makstas96@ya.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные способы обработки данных с использованием метода PPP, а также приведены сведения по построению геодезических сетей с использованием относительного метода ГНСС-измерений. Основной акцент сфокусирован на совершенствовании методики построения геодезических сетей с использованием современных методов спутниковых координатных определений. В качестве экспериментального объекта выбрана геодезическая сеть, состоящая из четырёх пунктов, образующих геодезический четырёхугольник. Пункты сети расположены на взаимном удалении от 88 до 300 км, что соответствует нормативным требованиям к структуре высокоточной геодезической сети. В работе приводятся сравнительные результаты оценки точности определения координат. Для сопоставления были использованы данные, полученные с помощью относительного метода (продолжительность сеансов — 72 часа) и метода PPP. Обработка данных по методу PPP выполнялась с использованием интернет-сервисов CSRS и webppp. Обработка относительным методом осуществлялась в программных продуктах Trimble Business Centre и «КРЕДО ТИМ» (модуль «КРЕДО ГНСС»). Оценка точности координат, определенных относительным методом, составила $m_{Xcp} = 0,024$ м, $m_{Ycp} = 0,020$ м, $m_{Zcp} = 0,014$ м, а методом PPP $m_{Xcp} = 0,005$ м, $m_{Ycp} = 0,006$ м, $m_{Zcp} = 0,004$ м, соответственно. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение метода PPP позволяет достичь высокой точности за существенно меньшее время, что подтверждает перспективность его использования для решения прикладных геодезических задач.

Ключевые слова: геодезические сети, методика создания геодезических сетей, относительный метод, метод PPP, высокоточная геодезическая сеть

Для цитирования:

Макаров С. О., Тихонов А. Д. Применение усовершенствованной методики создания геодезических сетей с использованием метода PPP при построении ВГС. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 19–26. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-19-26>

Optimized methodology for establishing high-precision geodetic control networks using precise point positioning

S. O. Makarov ¹✉, A. D. Tikhonov ¹

¹ State University for Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

e-mail: makstas96@ya.ru

Abstract. The paper considers the principal approaches to data processing using the Precise Point Positioning (PPP) method and summarizes the essential aspects of geodetic network establishment based on the relative GNSS measurement technique. Particular attention is devoted to improving the methodology for constructing geodetic networks by means of modern satellite-based coordinate de-

termination methods. The experimental case study involved a geodetic network composed of four points forming a geodetic quadrilateral. The network points are separated by distances ranging from 88 to 300 km, which satisfies the regulatory requirements for the configuration of a high-precision geodetic network. Comparative results of coordinate accuracy assessment are presented in the study. For comparison purposes, data obtained by the relative method with a session duration of 72 hours were compared with results derived from the PPP method. PPP data processing was performed using the CSRS and webppp online services. Relative processing was carried out in Trimble Business Center and CREDO TIM software, specifically within the CREDO GNSS module. The coordinate accuracy achieved by the relative method was $m_{X_{avg}} = 0.024$ m, $m_{Y_{avg}} = 0.020$ m, and $m_{Z_{avg}} = 0.014$ m, whereas the PPP method yielded $m_{X_{avg}} = 0.005$ m, $m_{Y_{avg}} = 0.006$ m, and $m_{Z_{avg}} = 0.004$ m. The results obtained indicate that the PPP method makes it possible to achieve high coordinate accuracy in substantially less time, thereby confirming its applicability for practical geodetic tasks.

Keywords: geodetic networks, network establishment methodology, PPP method, high-precision geodetic control networks

For citation:

Makarov S. O., Tikhonov A. D. (2026). Optimized methodology for establishing high-precision geodetic control networks using precise point positioning. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 19–26. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-4-19-26>

Введение

В последние десятилетия методы спутниковых координатных определений претерпевают значительные изменения. Одним из инновационных методов является метод высокоточных координатных определений – Precise Point Positioning (PPP).

В последние годы продолжается исследование метода PPP для целей геодезии. Можно выделить авторов, занимающихся подобными исследованиями: Н. С. Косарев, В. В. Калинин, В. И. Кафтан, М. Я. Брын, Л. А. Липатников, К. М. Антонович, R. Ebner, W. E. Featherstone, P. Heroux, Kallop M., Kouba J. и др. Изучение факторов, влияющих на точность координатных определений методом PPP, содержится в работах [1–5]. Исследования по созданию геодезических сетей с использованием спутниковой аппаратуры приведены в работах [6–11]. Анализ различных факторов, в целом влияющих на точность определения координат при использовании спутниковых методов, подробно приведен в публикациях [12–15]. Использование ГНСС-аппаратуры для решения геодезических задач описано в статьях [16–18].

Анализ научных трудов и публикаций показал отсутствие сведений об использовании метода PPP для построения геодезических сетей. В связи с этим авторы сочли необходи-

мым разработать усовершенствованную методику создания геодезических сетей.

Целью данной работы является рассмотрение возможности создания геодезических сетей на примере фрагмента высокоточной геодезической сети (ВГС) с использованием метода PPP обработки спутниковых данных.

Материалы и методы исследований

В настоящее время высокоточное получение координат пунктов с использованием метода PPP может быть реализовано как с помощью интернет-сервисов, так и с использованием различного программного обеспечения. К интернет-сервисам относятся: Trimble RTX, CSRS, magicPPP, PPPaaS IGN, APPS, WebPPP и PPPaaS [19–21]. Последние два сервиса являются отечественной разработкой, что свидетельствует об интересе к развитию применения метода PPP для решения различных задач на территории РФ. Среди программных обеспечений наиболее популярными программными продуктами и программным обеспечением являются: Trimble Business Centre, КРЕДО ТИМ (модуль КРЕДО ГНСС), Bernese, RTKlib, TropoGNSS [22, 23].

В настоящее время геодезические сети создаются преимущественно относительным методом ГНСС-измерений. Создание геодезических сетей – достаточно длительный и дорогостоящий процесс. Большинство наземных сетей создаются с использованием спутниковых (ГНСС) измерений, которые

проводятся и обрабатываются в соответствии с ГОСТ (ГОСТ Р 57372-2016 Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты высокоточной геодезической сети (ВГС). Технические условия, М., 2016. – С. 3–5). В указанном стандарте описан относительный метод определения координат, который подразумевает вычисление базовой линии между двумя пунктами. Расстояния между пунктами при использовании относительного метода ГНСС-измерений оказывают влияние на точность определения координат.

Между тем наличие в свободном доступе высокоточной эфемеридной и другой высокоточной информации (локальных моделей ионосферы и тропосферы, поправок часов спутников, влияния приливов (твердых и жидких)) для определения координат из

ГНСС-измерений делает возможным применение для этой цели метода PPP.

На наш взгляд, основными преимуществами метода PPP перед относительным методом являются:

- 1) точность определения координат не зависит от расстояний между пунктами;
- 2) меньшая продолжительность сеансов измерений.

Сдерживающими факторами для повсеместного применения данного метода являются недостаточное исследование его точностных возможностей и отсутствие официальных регламентирующих документов. На основании проведенных исследований приводятся существующие (с использованием относительного метода) и предлагаемые требования по созданию геодезических сетей (с использованием метода PPP), приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Существующие и предлагаемые требования ВГС

Параметр	Существующие требования	Предлагаемые требования
Режим измерений	Статика	Статика
Метод обработки	Статика (относительный метод)	Метод PPP
Расстояния между пунктами сети	От 100 до 250 км в районах с плотностью населения 35 и более на 1 км ² и в районах сейсмической активности	
Количество спутников	Не менее 6 (GPS и ГЛОНАСС) одновременно наблюдаемых спутников на каждую базовую линию	Не менее 15 спутников (7 ГЛОНАСС и 8 GPS) на каждом из пунктов сети
Дискретность записи	30 секунд	
Минимальный угол возвышения	10°	
Продолжительность 1 сеанса наблюдений	Не менее трех суток	3 часа
Характеристика ГНСС аппаратуры	Двухчастотное и двухсистемное	Многочастотное и мультисистемное

Как видно из табл. 1, предлагаемая методика создания геодезических сетей с использованием метода PPP имеет ряд преимуществ в сравнении с утвержденной методикой. Среди преимуществ можно выделить сокращение временных затрат на полевые работы и повышение точности в сравнении с относительным методом.

Предлагаемая методика по созданию геодезических сетей с использованием метода PPP может быть представлена в виде трех блоков.

Блок 1 – планирование сеансов и выполнение измерений включает в себя:

- 1) подготовка к измерениям;

- 2) выполнение измерений – продолжительность измерений 3 часа;

- 3) проверку сырых файлов на соответствие критериям: продолжительность измерений – 3 часа; дискретность – 30 секунд; количество спутников > 15 (7 ГЛОНАСС и 8 GPS); PDOP (Position Dilution of Precision) < 3.0; перерывы между сеансами измерений – 12 часов. Количество сеансов – 3.

Блок 2 состоит из нескольких пунктов и включает в себя следующие этапы:

- 1) обработку RINEX файлов с использованием интернет-сервисов. На этапе обработки следует обращать на то, чтобы было использовано не менее 15 спутников различных

систем, из которых семь спутников ГЛОНАСС и восемь GPS.

2) обработку *RINEX* файлов с целью контроля получаемой точности. Рекомендуется выполнять обработку с использованием программного обеспечения/интернет-сервиса с целью сопоставления результатов, полученных в пункте 1.

Блок 3. Уравнительные вычисления и оценка точности полученных данных.

Уравнивание геодезических сетей происходит посредством использования метода наименьших квадратов (МНК). Оценку точности можно выполнять по условиям фигур, что обеспечивает контроль точности по внутренней сходимости. Основное правило заключается в том, что сумма приращений координат (невязка) по замкнутому контуру должна быть равна нулю. Второй способ – по разностям двойных измерений. Разность между ними не должна превышать нормативно допустимую величину. При построении сети ВГС необходимы контрольные измерения не менее трёх раз.

Для апробации методики на практике была рассмотрена геодезическая сеть, состоящая из четырёх пунктов, образующих геодезический четырёхугольник. Как известно, геодезический четырёхугольник является достаточно жёсткой с точки зрения геометрии фигурой и позволяет весьма надёжно оценить точность измерений по невязкам замкнутых фигур.

Для проведения эксперимента были выбраны необработанные файлы формата *RINEX* с пунктов сети базовых станций EFT CORS. На рис. 1 приведена схема сети, пункты которой расположены на удалении друг от друга от 88 до 300 км.

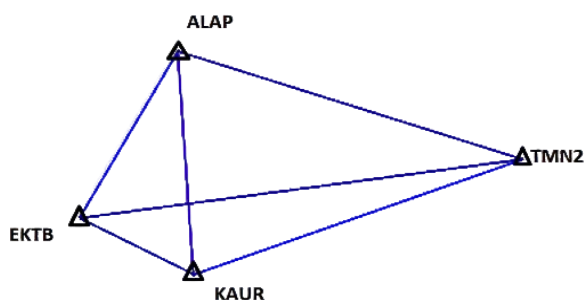


Рис. 1. Схема сети, выбранной для апробации методики

Практическая апробация разработанной методики была осуществлена в два этапа.

1 этап: обработка сеансов спутниковых измерений продолжительностью 72 часа в программном обеспечении КРЕДО ТИМ (модуль КРЕДО ГНСС) и в программном обеспечении *Trimble Business Centre* (TBC).

2 этап: обработка сеансов спутниковых измерений, продолжительностью 3 часа с использованием интернет-сервисов *Trimble RTX* и *CSRS*.

Для обеспечения независимости измерений векторы должны быть определены в разные сеансы измерений. Сеанс 1 *EKTБ-ALAP* (136 км) и *KAUR-TMN2* (236 км); Сеанс 2 *EKTБ-KAUR* (88 км) и *ALAP-TMN2* (240 км); Сеанс 3 *EKTБ-TMN2* (300 км) и *ALAP-KAUR* (161 км). *RINEX* файлы были обработаны в программных обеспечениях КРЕДО ТИМ (КРЕДО ГНСС) и в TBC. Впоследствии были сформированы фигуры, в табл. 2 приводятся результаты оценки точности по внутренней сходимости.

Таблица 2. Оценка точности координат, относительный метод ГНСС

Фигуры	Сумма приращений координат		
	Приращение координат	КРЕДО ТИМ, м	TBC, м
<i>EKTБ-ALAP-TMN2</i>	ΣdX	0,055	0,048
	ΣdY	0,052	0,042
	ΣdZ	-0,001	0,000
<i>EKTБ-KAUR-TMN2</i>	ΣdX	0,022	0,018
	ΣdY	0,021	0,017
	ΣdZ	0,031	0,026
<i>EKTБ-ALAP-KAUR</i>	ΣdX	0,029	0,027
	ΣdY	0,029	0,018
	ΣdZ	-0,034	-0,026
<i>ALAP-TMN2-KAUR</i>	ΣdX	0,004	0,003
	ΣdY	0,002	-0,004
	ΣdZ	0,002	-0,003

В табл. 2 приняты следующие обозначения: ΣdX – сумма приращений координат (невязка по замкнутому контуру) по координате X ; ΣdY – сумма приращений координат (невязка по замкнутому контуру) по координате Y ;

ΣdZ – сумма приращений координат (невязка по замкнутому контуру) по координате Z .

Как видно из табл. 2, результаты оценки точности при использовании КРЕДО ГНСС и ТВС практически сопоставимы между собой. Согласно приказу Росреестра от 19.09.2022 П/0344 (ред. от 27.01.2025) «Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам», точность взаимного положения в плане не должна превышать $3 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-8} \cdot D$, а по высоте $5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-8} \cdot D$, где D – расстояние, выраженное в мм. Приведённые в табл. 2 значения соответствуют утверждённым требованиям.

Следует также отметить, что приращения координат были получены в системе координат ITRF 2014. Дальнейшие расчёты также выполнены в этой системе координат, чтобы избежать ошибок при переводе из одной системы координат в другую.

Второй этап исследования заключается в обработке трёхчасовых RINEX-файлов с использованием метода PPP. На основании приращений координат были сформированы четыре фигуры: ЕКТВ – АЛАР – ТУМН (фигура 1); ЕКТВ – КАУР – ТУМН (фигура 2); ЕКТВ – АЛАР – КАУР (фигура 3); АЛАР – ТУМН – КАУР (фигура 4). В табл. 3 приводятся значения сумм приращений координат (невязок) в каждом из трёх сеансов измерений, а также их средние значения.

Таблица 3. Оценка точности при использовании PPP метода

№ фигуры	ΣdX ΣdY ΣdZ	Сеанс 1		Сеанс 2		Сеанс 3		Ср значения	
		CSRS, м	webPPP, м	CSRS, м	webPPP, м	CSRS, м	webPPP, м	CSRS, м	webPPP, м
1	ΣdX	0,006	0,006	0,004	0,008	0,003	0,005	0,004	0,006
	ΣdY	0,009	0,007	0,008	0,004	0,010	0,008	0,009	0,006
	ΣdZ	-0,003	0,001	-0,001	0,003	0,001	0,002	-0,001	0,002
2	ΣdX	0,004	0,004	0,001	0,004	-0,001	0,004	0,001	0,004
	ΣdY	-0,007	-0,005	-0,008	-0,005	-0,011	-0,002	-0,009	-0,004
	ΣdZ	-0,001	-0,007	-0,004	-0,008	-0,005	-0,006	-0,003	-0,006
3	ΣdX	0,003	0,007	0,005	0,007	0,004	0,006	0,004	0,007
	ΣdY	0,003	0,002	0,007	0,004	0,006	0,003	0,005	0,003
	ΣdZ	0,001	0,006	0,005	0,007	0,004	0,006	0,003	0,006
4	ΣdX	-0,004	-0,004	-0,001	-0,002	0,001	0,002	-0,001	0,001
	ΣdY	0,016	0,010	0,011	0,011	0,012	0,009	0,013	0,010
	ΣdZ	-0,002	0,001	-0,001	0,002	-0,001	0,001	-0,001	0,001

Результаты

При сравнении данных из табл. 2, 3 можно заметить, что при построении геодезических сетей методом PPP необходимая точность достигается всего за три сеанса продолжительностью по три часа, тогда как при создании сети относительным методом требуется несколько сеансов продолжительностью не менее трёх суток.

Оценка точности по разностям двойных измерений, выполненная методом PPP для координат, полученных в системе координат (СК) ГСК-2011, составила: $m_X = 0,005 \text{ м}$, $m_Y = 0,006 \text{ м}$, $m_Z = 0,004 \text{ м}$. Для относительного

метода оценка точности составила: $m_X = 0,024 \text{ м}$, $m_Y = 0,020 \text{ м}$, $m_Z = 0,014 \text{ м}$.

Конечно, следует отметить, что данная сеть уравнивалась как свободная и при включении в её построение пунктов с твёрдыми координатами реальная точность окажется несколько ниже.

Обсуждение

Приведенные результаты в работе представляют практическую значимость и обосновывают необходимость совершенствования методики построения геодезических сетей различных классов с использованием метода PPP.

Несмотря на то, что в статье рассмотрено создание геодезической сети на примере ВГС, разработанную методику можно использовать для создания спутниковой геодезической сети 1-го класса при сокращении продолжительности измерений до 2 часов.

Заключение

При использовании предложенной методики определения координат геодезических пунктов по методу PPP достигается более высокая точность определения координат, чем в нормативной документации. При этом время на выполнение полевых работ сокращается

более чем в 20 раз. Таким образом, как с точки точностной оценки, так и временной, предложенная методика представляется довольно перспективной для практического применения и свидетельствует о необходимости изменения нормативной документации в части пунктов: времени выполнения работ, количества используемых спутников; требований к ГНСС-аппаратуре. Точность определения координат геодезических пунктов в СК ГСК-2011 при использовании относительного метода составила $m_x = 0,024$ м, $m_y = 0,020$ м, $m_z = 0,014$ м, при использовании PPP метода: $m_x = 0,005$ м, $m_y = 0,006$ м, $m_z = 0,004$ м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ochałek A., Niewiem W., Puniach E., Cwiąkała P. Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX Trimble technology. Civil and environmental engineering reports. 2018. Vol. 28 (4). P. 49–61.
2. Karpik A. P., Kosarev N. S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Yu. Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurement. Geodesy and Cartography. 2018. Vol. 44. Issue 4. P. 140–145.
3. Тихонов А. Д., Макаров С. О. Применение алгоритма обработки спутниковых данных для создания геодезических сетей протяженных объектов. Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : сб. ст. Могилев : Белорусско-Российский университет, 2021. С. 370–371.
4. Макаров С. О. Исследование точности спутникового позиционирования при использовании современных методов обработки спутниковых данных. Грозненский естественнонаучный бюллетень, 2023. Том 8. № 1 (31). С. 31–38. DOI: 10.25744/genb.2023.15.64.003.
5. Войтенко А. В., Быков В. Л. Методика точного дифференциального позиционирования: краткий обзор. Геодезия и картография. 2016. № 8. С. 26–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-914-8-26-30.
6. Морозов В. Н., Кафтан В. И., Татаринов В. Н., Колесников И. Ю., Маневич А. И., Мельников А. Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 г. (г. Напа, штат Калифорния, США). Геотектоника. 2018. № 4. С. 90–102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069.
7. Мельников А. Ю. Разработка методики анализа деформационных процессов в сейсмо-активных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений: автореферат диссертации канд. техн. наук. Москва, 2019. 152 с.
8. Бовшин Н. А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011. Геодезия и картография. 2019. № 2. С. 2–14. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
9. Leandro R., Landau H., Nitschke M., Glocker M., Seeger S., Chen X., Deking A., Ben Tahar M., Zhang F., Stolz R., Talbot N., Lu G., Ferguson K., Brandl M., Gomez Pantoja V., Kipka A. RTX Positioning: the Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/>.
10. Тихонов А. Д., Макаров С. О. Анализ точности координат геодезических пунктов, определённых с помощью PPP-сервисов. Качество. Инновации. Образование. 2021. № 3. С. 71–83.
11. Wang, G. Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. Journal of Geodetic Science. 2013. Vol. 3(1). P. 22–31. DOI 10.2478/jogs-2013-0001.
12. Wang, G. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements. Manuscripta Geodetica. Durango, CO, United States, 1993. Vol. 18. P. 91–98.
13. J. F. Zumberge [et al.] Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research. Durango, CO, United States, 1997. Mar. 10. Vol. 102, (B3). P. 5005–5017. DOI 10.1029/96JB03860.

14. Black, H. D. An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction. *Journal of Geophysical Research*. 1978. Vol. 83, N.B4. P. 1825–1828.
15. GPS-Theory and Practice : Astronomical Institute, University of Bern.– 4th revised edition. Wien : Springer-Verlag, 1997. 389 с.
16. Антонович К. М., Липатников Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (precise point positioning). *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2013. № S4. С. 44–47.
17. Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. Study on GPS-PPP precision for short observation sessions [Text] / S. Gandolfi, / *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21(3). P. 887–896. DOI 10.1007/s10291-016-0575-4.
18. Montenbruck O. [et al.]. GNSS satellite geometry and attitude models. *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56(6). P. 1015–1029. DOI 10.1016/j.asr.2015.06.019.
19. Липатников Л. А. Применение методики точного абсолютного позиционирования для высокоточного определения положения геодезических пунктов в общеземной системе координат // *Геодезия и картография*. 2012. № 7. С. 13–16.
20. M. A. d'Alessio [et al.] Slicing up the San Francisco Bay area: Block kinematics and fault slip rates from GPS-derived surface velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2005. June 11. Vol. 110, B6, B06403. P. 1–19. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2004JB003496> (visited on 01/19/2021) ; DOI 10.1029/2004JB003496.
21. Kowalczyk K., Kowalczyk J. Application of PPP Solution to Determine the Absolute Vertical Crustal Movements. Case Study for North eastern Europe, “Environmental Engineering” 10th International Conference). Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2013. 27–28 April 2017, DOI 10.3846/enviro.2017.207.
22. Шевчук С. О., Косарев Н. С., Мелеск А. Х. Исследования точности метода PPP для навигационно-геодезического обеспечения геофизических работ. *Геопрофи*. 2016. № 3. С. 10–15.
23. Косарев Н. С., Борисов Д. М., Малороссиянов С. М. Разработка программного продукта для обработки ГНСС измерений методом PPP: первые результаты. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2025. Т. 12. № 1. С. 78–85.

REFERENCES

1. Ochalek A., Niewiem W., Puniach E., Ćwiakała P. (2018). Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX Trimble technology. *Civil and environmental engineering reports*. Vol. 28 (4). P. 49 – 61
2. Karpik A. P., Kosarev N S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Yu. (2018). Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurement. *Geodesy and Cartography*. Vol. 44. Issue 4. P. 140 – 145.
3. Tikhonov A. D., Makarov S. O. (2021). *Application of the satellite data processing algorithm for creating geodetic networks of extended objects. Materials, equipment and resource-saving technologies : collection of articles [Application of a satellite data processing algorithm for establishing geodetic networks for extended linear objects]*. Mogilev : Belarusian-Russian University, P. 370–371. [in Russian].
4. Makarov S. O. (2023). Research of the accuracy of satellite positioning when using modern methods of processing satellite data. *Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten [Grozny Natural Science Bulletin]*, Vol. 8. No. 1 (31). Pp. 31-38. DOI: 10.25744/genb.2023.15.64.003 [in Russian].
5. Voitenko A. V., Bykov V. L. (2016). The Technique of Precise Differential Positioning: A Brief Overview. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. No. 8. Pp. 26–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-914-8-26-30.
6. V. N. Morozov, V. I. Kaftan, V. N. Tatarinov, I. Yu. Kolesnikov, A. I. Manevich, and A. Yu. Melnikov. (2018). Numerical Modeling of the Stress-Strain State and GPS Monitoring Results of the Epicentral Zone of the August 24, 2014 Earthquake (Napa, California, USA). *Geotectonics [Geotectonics]*. No. 4. Pp. 90–102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069. [in Russian].
7. Melnikov, A. Yu. Development of a methodology for analyzing deformation processes in seismically active regions based on satellite high-precision coordinate determinations: Abstract of the thesis of Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2019. 152 p. [in Russian].
8. Bovshin N. A. (2019). High-Precision GNSS Coordinate Determinations in the GSK-2011 System *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. No. 2. Pp. 2-14. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14 [in Russian].

9. Leandro R., Landau H., Nitschke M., Glocker M., Seeger S., Chen X., Deking A., Ben Tahar M., Zhang F., Stolz R., Talbot N., Lu G., Ferguson K., Brandl M., Gomez Pantoja V., Kipka A. RTX Positioning: the Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning Retrieved from: <https://www.researchgate.net/>
10. Tikhonov A. D., Makarov S. O. (2021). Analysis of the Accuracy of Geodetic Points Coordinates Determined Using RRR Services. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye.. [Quality. Innovations. Education]*. No. 3. Pp. 71–83. [in Russian].
11. Wang, G. (2013). Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. *Journal of Geodetic Science*. Vol. 3(1). P. 22–31. DOI 10.2478/jogs-2013-0001.
12. Wu J. T. [et al.] (1993). Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements. *Manuscripta Geodetica*. Durango, CO, United States, Vol. 18. P. 91–98.
13. Zumberge J. F. [et al.] (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*.—Durango, CO, United States, Mar. 10. Vol. 102, (B3). P. 5005–5017. DOI 10.1029/96JB03860.
14. Black, H. D. (1978). An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction. *Journal of Geophysical Research*. 1978. Vol. 83, N.B4. P. 1825–1828.
15. GPS-Theory and Practice : Astronomical Institute, University of Bern.— 4th revised edition. Wien : Springer-Verlag, 1997. 389 c.
16. Antonovich K. M., Lipatnikov L. A. (2013). Improvement of the methodology for precise differential positioning based on GNSS measurements (precise point positioning). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyomka. [Bulletin of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*. No. S4. Pp. 44-47. [in Russian].
17. Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. (2017). Study on GPS-PPP precision for short observation sessions S. Gandolfi . *GPS Solutions*. Vol. 21(3). P. 887–896. DOI 10.1007/s10291- 016-0575-4.
18. Montenbruck O. [et al.]. (2015). GNSS satellite geometry and attitude models. *Advances in Space Research*. Vol. 56(6). P. 1015–1029. DOI 10.1016/j.asr.2015.06.019. [in Russian].
19. Lipatnikov L. A. (2012). application of the technique of accurate absolute positioning for high-precision determination of the position of geodetic points in the all-zemle coordinate system. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. No. 7. Pp. 13-16.
20. M. A. d'Alessio [et al.] (2005). Slicing up the San Francisco Bay area: Block kinematics and fault slip rates from GPS-derived surface velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. June 11. Vol. 110, B6, B06403.– P. 1–19. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2004JB003496> (visited on 01/19/2021) ; DOI 10.1029/2004JB003496.
21. Kowalczyk, K., Kowalczyk J. (2013). Application of PPP Solution to Determine the Absolute Vertical Crustal Movements. Case Study for North eastern Europe, “Environmental Engineering” 10th International Conference). *Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania*, 2013. 27–28 April 2017, DOI 10.3846/enviro.2017.207. [in Russian].
22. Shevchuk S. O., Kosarev N. S., and Melesk A. Kh. (2016). Research on the Accuracy of the PPP Method for Navigation and Geodetic Support of Geophysical Works. *Geoprofi*. No. 3. Pp. 10 – 15.
23. Kosarev N. S., Borisov D. M., Malorossiyanov S. M. (2025). Development of a Software Product for Processing GNSS Measurements by the RRR Method: First Results. *Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*. Vol. 12. No. 1. Pp. 78-85.

Об авторах

Станислав Олегович Макаров – старший преподаватель кафедры «геодезии и геоинформатики» ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству.

Александр Дмитриевич Тихонов – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «геодезии и геоинформатики».

Author details

Stanislav O. Makarov – Senior Lecturer, Department of Geodesy and Geoinformatics.

Alexander D. Tikhonov – PhD, Associate Professor, Department of Geodesy and Geoinformatics.

Получено / Received 16.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised 17.06.2026

Принята к публикации / Accepted 29.06.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.721.221.6

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-27-36>

Создание предварительного проекта лазерного сканирования на основе синтетического облака точек, полученного методом виртуального (имитационного) лазерного сканирования

Н. И. Хушт^{1✉}, М. Я. Брын², Д. А. Гура³, К. Л. Саввиди³

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

³ ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Российская Федерация

e-mail: nafset-khusht@yandex.ru

Аннотация. Повсеместное внедрение лазерного сканирования как современного метода съёмки больших территорий вызывает необходимость повышения качества исходных данных для съёмки, включая данные, получаемые в процессе рекогносцировки местности, так как от качества исходных данных зависит и качество производства лазерного сканирования, и, как следствие, точность итоговой цифровой модели местности. Для решения данной проблемы авторами предлагается методика создания предварительного проекта лазерного сканирования на основе синтетического облака точек, полученного методом виртуального лазерного сканирования на базе плагина Blensor программного обеспечения Blender. Суть метода виртуального сканирования заключается в имитации процесса сканирования с использованием цифровых моделей объектов, созданных на основе имеющихся топографических карт, геоинформационных и картографических ресурсов. Так, авторами была произведена апробация предложенной методики на примере участка городской территории Краснодара, в ходе которой экспериментальным путём был выбран оптимальный тип виртуального сканера, а также набор параметров виртуального сканирования, обеспечивающих получение синтетического облака точек, наиболее приближенного по своим характеристикам к облаку точек, получаемому при производстве съёмки на местности.

Ключевые слова: рекогносцировка местности, виртуальное (имитационное) лазерное сканирование, синтетическое облако точек

Для цитирования:

Хушт Н. И., Брын М. Я., Гура Д. А., Саввиди К. Л. Создание предварительного проекта лазерного сканирования на основе синтетического облака точек, полученного методом виртуального (имитационного) лазерного сканирования. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 27–36. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-27-36>

Methodology for preliminary laser scanning project design using synthetic point clouds from virtual scan simulation

N. I. Khusht^{1✉}, M. Ya. Bryn², D. A. Gura³, K. L. Savvidi³

¹Polymetal Engineering JSC, St. Petersburg, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation

³Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

e-mail: nafset-khusht@yandex.ru

Abstract. The widespread deployment of terrestrial laser scanning for large-scale topographic surveys necessitates rigorous control over input data quality. The fidelity of the resulting digital terrain model is contingent upon preliminary reconnaissance outcomes, which dictate critical field acquisition parameters. To mitigate uncertainties at this planning stage, the authors propose a preliminary laser scanning project design grounded in synthetic point cloud generation. Data emulation is performed via virtual laser scanning implemented through the Blensor plugin within the Blender environment. This methodology entails simulating the surveying process on high-fidelity object-based digital models reconstructed from authoritative topographic maps and geospatial databases. The proposed methodology was experimentally validated on a representative urban district in Krasnodar. During validation, an optimal virtual sensor configuration and a corresponding parameter set were empirically derived to maximize the statistical and geometric congruence between the simulated output and reference datasets acquired through conventional geodetic measurements.

Keywords: terrain reconnaissance, virtual scan simulation, synthetic point cloud

For citation:

Khusht N. I., Bryn M. Ya., Gura D. A., Savvidi K. L. (2026). Methodology for preliminary laser scanning project design using synthetic point clouds from virtual scan simulation. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 27–36. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-27-36>

Введение

В настоящее время строительство промышленных и гражданских объектов осуществляется поэтапно, начиная от стадии проектирования и заканчивая вводом объектов в эксплуатацию. Проектированию всегда предшествует проведение изысканий, в частности инженерно-геодезических изысканий. Согласно Своду правил (СП 317.1325800.2017 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». – URL: <http://docs.cntd.ru> – Текст : электронный) при проведении изысканий на первом этапе осуществляют в том числе следующие виды предварительных работ:

- сбор и анализ материалов и данных топографо-геодезических работ и инженерно-геодезических изысканий прошлых лет;
- рекогносцировочное обследование местности, заключающееся в сверке современного состояния ситуации и рельефа с их отображением на топографических планах и картах, полученных по результатам инженерно-геодезических изысканий прошлых лет.

Так как современная застройка имеет комплексный характер и осуществляется на больших территориях, чаще всего для оперативного получения и обработки больших массивов исходных данных о местности, рельефе и объектах в процессе съёмки применяется воздушное лазерное сканирование. Вместе с тем, применение

воздушного лазерного сканирования требует повышения качества проведения описанных выше предварительных работ, включая рекогносцировочное обследование местности, в частности, для планирования и подбора маршрута и высоты полёта воздушного судна со сканирующим устройством таким образом, чтобы полученное облако точек обеспечивало построение точных и достоверных моделей местности, рельефа и объектов.

В связи с этим возникает задача по созданию предварительных моделей местности, рельефа и объектов для формирования проекта лазерного сканирования. Суть предварительного моделирования заключается в планировании полевых работ по воздушному лазерному сканированию на основании имеющихся исходных данных. Как правило, современные методы планирования полевых работ по воздушному лазерному сканированию имеют дело с двумерными источниками информации, включая картографические данные, результаты ранее проведённых съёмок местности, данные электронно-цифровых карт и ГИС-ресурсов.

Так, для предварительного моделирования местности, рельефа и объектов для оценки и задания параметров планируемого воздушного лазерного сканирования в трёхмерном виде, нами предлагается использование метода виртуального (имитационного) лазерного сканирования. Суть метода заключается

в создании искусственного облака точек на основе имитации реального процесса сканирования в виртуальной среде специализированного программного обеспечения с помощью виртуальных сканирующих устройств, к которым, в частности, относится виртуальный сканер Velodyne, алгоритмы работы которого заложены в плагине Blensor программного продукта Blender [1, 2]. При этом посредством виртуального лазерного сканирования может быть симитирован почти любой вид лазерного сканирования, включая воздушное, наземное и мобильное лазерное сканирование, что ещё на этапе планирования работ позволяет корректно подобрать различные параметры лазерной съёмки. Так, в отношении воздушного лазерного сканирования имитация методом виртуального лазерного сканирования позволяет оптимально подобрать высоту сканирования, расстояние между маршрутами, сориентировать положение камеры в пространстве. Получаемые по результатам имитационного лазерного сканирования искусственные облака точек являются предварительными моделями для реальных облаков точек, получаемых при производстве сканирования на местности.

Известным примером использования данного имитационного сканера для создания искусственного облака точек является работа создателей игры Grand Theft Auto V, разработавших плагин, который устанавливал имитированный сканер Velodyne 64 на крышу транспортного средства. По мере совершенствования виртуальной среды в данной игре и приближения ее к реальной ситуации попутно был создан массив трёхмерных данных SqueezeSeg, содержащий в себе миллионы искусственных точек лазерного отражения [3].

Особенность данного массива заключалась в его маркированности, или принадлежности каждой точки массива к определенному классу: «точки земли», «здания», «дороги», «растительность», «транспорт», «люди» и т. д. В качестве подобных «маркированных облаков точек» были созданы массивы SynthCity, Paris-rue-Madame MLS, содержащий 20 миллионов точек (x ; y ; z и коэф-

фициент отражения), Валле, набор данных IQ-mulus, содержащий 300 миллионов точек (x , y , z , время, отражение и количество эхосигналов) и Ройнард, Париж-Лилль-3D, а также наиболее известный массив Semantic3D, упоминаемый в работе ряда исследователей в данной области. Объединяющим критерием всех упомянутых массивов является создание виртуальной городской среды, представленной в трехмерном виде [1–17].

Методы и материалы

Авторами рассматривается возможность создания только предварительного проекта лазерного сканирования участка местности на основе синтетического облака точек на примере участка территории города Краснодара.

С учетом научных трудов ряда исследователей, в первую очередь создателей игры Grand Theft Auto V, а также разработчиков Synth City – искусственного полномасштабного облака точек городской среды, было принято решение о необходимости использовать плагин Blensor для Blender 3D [1–3, 8, 10].

Blender 3D представляет собой профессиональное программное обеспечение с открытым исходным кодом для 3D-моделирования, рендеринга и создания визуальных эффектов. Плагин Blensor является специализированной виртуальной средой для создания проектов по виртуальному лазерному сканированию и настройке параметров виртуального сканера.

Для обеспечения качества проведения эксперимента участок городской среды был подобран таким образом (рис. 1, 2), что отражал наиболее распространённый тип застройки, характерный для города Краснодара, а именно [13]:

- большие площади секторов, предназначенных для индивидуального жилищного строительства, характеризующегося малой этажностью;
- нарушение противопожарных расстояний между зданиями и сооружениями, сложившееся исторически в связи со станичным типом застройки Краснодара.



Рис. 1. Жилой квартал города Краснодара на пересечении Северной улицы и улицы Тургенева (по данным Open Street Map)

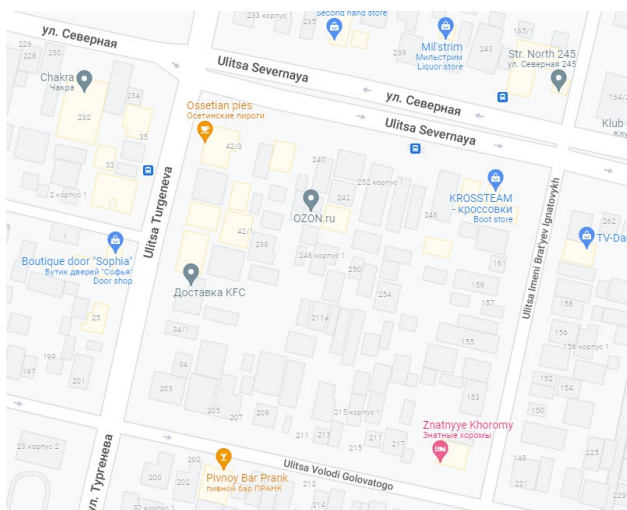


Рис. 2. Жилой квартал города Краснодара на пересечении Северной улицы и улицы Тургенева (по данным Google Map)

На следующем этапе с использованием картографических подложек Open Street Map и Google Map были сгенерированы 3D-тела, представляющие собой имитацию зданий и сооружений и представленные в виде mesh-поверхностей (рис. 3), ориентированных на картографической подложке в среде программного обеспечения Blender.

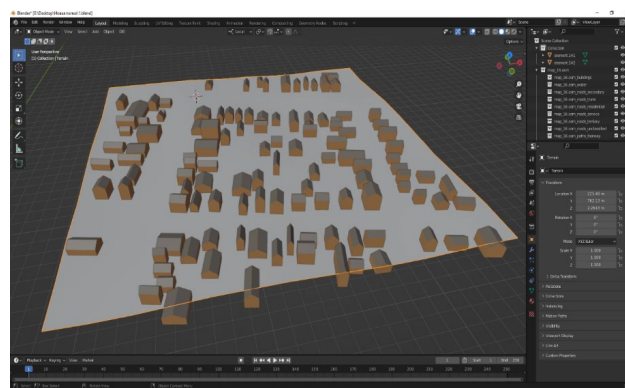


Рис. 3. Карта с восстановленными объектами (индивидуальные жилые дома)

Параллельно положение 3D-тел сверялось с данными ранее произведённой топографической съёмки масштаба 1 : 500 на данном участке городской территории (рис. 4), в том числе на предмет появления новых объектов или ликвидации существующих.



Рис. 4. Фрагмент топографической съёмки масштаба 1 : 500 на жилой квартал города Краснодара на пересечении Северной улицы и улицы Тургенева

Представленный набор сгенерированных объектов выступал в качестве шаблонной заготовки для формирования искусственной пространственной городской среды квартала города Краснодара и на последующих этапах проходил процедуру детализации и насыщения объектами озеленения и городского благоустройства, включая малые архитектурные формы, объекты освещения и электроснабжения, а также иные элементы озеленения проектируемого квартала городской территории (рис. 5).

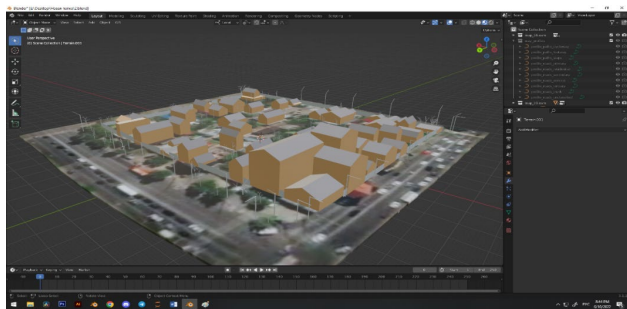


Рис. 5. Подготовленная модель квартала городской территории

Результаты

Как уже было отмечено ранее, генерация синтетического облака точек производилась путём применения виртуального сканера, встроенного в плагин Blensor. При этом, так как Blensor позволяет работать с различными типами виртуальных сканеров, представленных в табл. 1, предварительно были произведена тестовая апробация каждого из них на простых 3D-телах с целью выявления наиболее приближенного по параметрам к реальному сканированию виртуального сканера.

Таблица 1. Типы сканеров, встроенных в программное обеспечение Blensor

Наименование	Значение (по умолчанию)	Влияние на процесс сканирования
Тип настройки	Выпадающий список (Velodyne HDL)	Определяет наименование объекта – сканера. При изменении настройки изменяется наименование объекта в обозревателе сцены. Новое название объекта-сканера размещается в обозревателе сцены в алфавитном порядке. Выбор типа сканера определяет принцип работы имитации сканера
Тип сканера	Velodyne HDL	Имитация ротационного инфракрасного сканера.
	Ibeo LUX	Имитация линейного сканера с четырьмя лучами

Наименование	Значение (по умолчанию)	Влияние на процесс сканирования
	TOF camera	Имитация сканера, излучение которого направлено в область обзора камеры
	Kinect	Имитация одноименного сканера по технологии компании Primesense
	Generic LIDAR	Имитация сканера, создающего одну горизонтальную линию из лучей посередине области обзора камеры
	Depthmap	Имитация сканирования с помощью стереокамеры

По результатам проведённых испытаний в качестве наиболее приближенного к реальному сканеру был выбран виртуальный сканер ротационного типа Velodyne HDL-64E.

Следующим шагом выступил подбор параметров виртуального сканирования через окно настроек виртуального сканера (рис. 6, табл. 2).

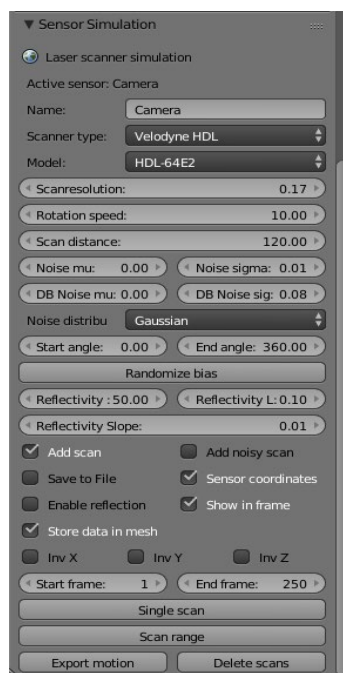


Рис. 6. Окно настроек виртуального сканера Velodyne HDL-64E

Таблица 2. Сводная таблица настроек ротационного сканера Velodyne HDL-64E

Наименование настройки	Значение (по умолчанию)	Влияние на процесс сканирования
Scanresolution	Ползунок с интервалом (0.17)	Определяет угол расхождения по горизонтали между соседними лучами в радианах. При увеличении значения (макс – 3.14 (1 радиан)) получаемое облако точек становится менее плотным. При сравнении узоров структуры формируемых облаков при значении по умолчанию формируются горизонтальные линии, а при максимальном значении настройки – вертикальные. Равномерная сетка формируется при значении настройки 0.5 радиан
Rotation speed	Ползунок с интервалом (100)	Определяет скорость вращения сканера при формировании серии сканирования. Настройка динамическая, ее влияние на процесс сканирования можно увидеть только при проведении серии сканов. На Single scan не влияет. При повышении значения настройки увеличивается количество раз, которые сканер-камера излучает лучи на 2π радиан вокруг сканера-камеры за определенное количество кадров (frames)
Scan distance	Ползунок с интервалом (120)	Определяет максимальное расстояние, на котором могут появляться точки отражения. Считается в Blender units
Noise mu	Ползунок с интервалом (0.0)	Определяет смещение центра гауссовского шума в направлении от объектива сканера-камеры
Noise sigma	Ползунок с интервалом (0.01)	Определяет смещение каждой точки отражения, относительно математического ожидания их положения
DB Noise mu	Ползунок с интервалом (0.01)	Не определено
DB Noise sigma	Ползунок с интервалом (0.01)	Не определено
Noise distribution	Выпадающий список (Gaussian)	Выбор функции определения нормального распределения
Reflectivity Distance	Ползунок с интервалом (50.0)	Объекты, находящиеся к сканеру ближе, чем указанная дистанция, не создают отражений
Reflectivity Limit	Ползунок с интервалом (0.10)	Объекты, находящиеся дальше значения настройки Reflectivity Distance, будут иметь отражения не меньше значения данной настройки

Из представленных выше настроек особое внимание было уделено настройкам, связанным с возможностью наложения «шумов» на «чистые» облака точек, а именно настройкам Noise mu, Noise sigma, Noise distribution, позволяющим создавать «шумовые» характеристики облаков точек, подчиненные переменным параметрам гауссовского (нормального) закона распре-

деления, и приближать синтетическое облако точек по своим параметрам к результатам реального сканирования [1, 2].

Так, при имитационном сканировании виртуально созданного пригорода Краснодара были отобраны опытным путём и представлены значения настроек виртуального ротационного сканера Velodyne HDL-64E, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Параметры виртуального сканера, предустановленные для формирования синтетического облака точек

Наименование характеристики	Значение характеристики
Scanner type	Velodyne HDL
Model	HDL-64E2
Scanresolution	0,50
Rotation speed	7,00
Noise mu	0,00
Noise sigma	0,10
DB Noise mu	0,00
DB Noise sigma	0,00
Noise distribution	Gaussian
Start angle	0,00
End Angle	360,00
Reflectivity Distance	50,00
Reflectivity Limit	0,10
Reflectivity Slope	0,01
Add scan	No
Add noisy scan	Yes
Save to File	No
Sensor coordinates	Yes
Enable reflection	No
Show in frame	No
Store data in mesh	Yes
Inv X	No
Inv Y	No
Inv Z	No
Start frame	1
End frame	250

Итоговый результат, представленный в виде сгенерированного облака точек лазерного отражения, представлен на рис. 7.

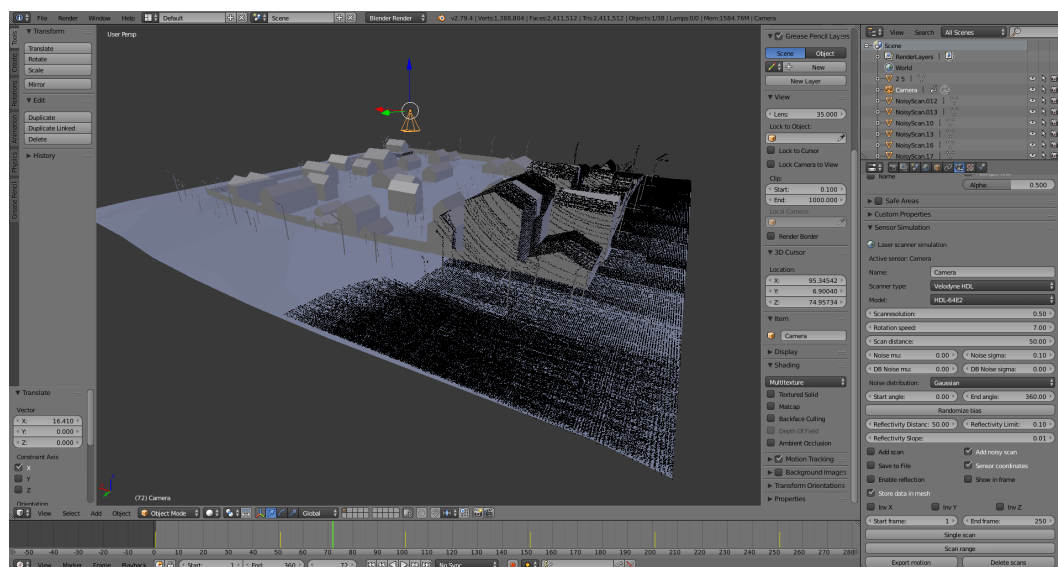


Рис. 7. Сгенерированное искусственное облако точек в плагине Blensor для Blender

Заключение

Исходя из представленных выше наблюдений, как при работе со сгенерированным

облаком точек, полученном в результате виртуального сканирования части города Краснодара, так и при предварительном сканировании тестовых объектов, представленных в

виде простых 3D-тел, можно сделать вывод о необходимости приближения параметров искусственного облака точек к реальному на каждом этапе производства имитационного сканирования, а именно:

– на этапе подготовки шаблонной заготовки путем тщательной проработки деталей объектов различных классов (растительность,

здания, строения, сооружения, опоры ЛЭП и т. д.);

– на этапе применения виртуального сканера путем настройки отдельных параметров, при этом особое внимание следует уделить настройкам, отвечающим за параметры «гауссовских шумов» сканера (Noise Mu, Noise Sigma, DB Noise Mu, DB Noise Sigma).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Community B. O. Blender — a 3D modelling and rendering package; Blender Foundation. 2018.
2. Bebis G., Boyle R., Parvin B. [et al.] Gschwandtner M., Kwitt R., Uhl A., Pree W. BlenSor: Blender Sensor Simulation Toolbox. *Advances in Visual Computing : ser. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2011. P. 199–208.
3. Wu B., Wan A., Yue X., Keutzer K. Squeeze Seg: Convolutional Neural Nets with Recurrent CRF for Real Time Road Object Segmentation from 3D LiDAR Point Cloud 2017. URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). — arXiv:1710.07368 [cs].
4. Dosovitskiy A., Ros G., Codevilla F., Lopez A., Koltun V. CARLA: An Open Urban Driving Simulator. 2017, Nov. URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). arXiv:1711.03938 [cs].
5. Serna A., Marcotegui B., Goulette F., Deschaud J.-E. Paris-rue-Madame database: A 3D mobile laser scanner dataset for benchmarking urban detection, segmentation and classification methods. 4th International Conference on Pattern Recognition, Applications and Methods (ICPRAM 2014) : conference proceedings. Angers, France, 2014, Mar.
6. Chang A. X., Funkhouser T., Guibas L., Hanrahan P., Huang Q., Li Z., Savarese S., Savva M., Song S., Su H., Xiao J., Yi L., Yu F. ShapeNet: An Information-Rich 3D Model Repository 2015, Dec. URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). — arXiv:1512.03012 [cs].
7. Vallet B., Bredif M., Serna A., Marcotegui B., Paparoditis N. TerraMobilita/iQmulus urban point cloud analysis benchmark. *Computers & Graphics*. 2015. Vol. 49. P. 126–133.
8. Wu B., Zhou X., Zhao S., Yue X., Keutzer K. SqueezeSegV2: Improved Model Structure and Unsupervised Domain Adaptation for Road-Object Segmentation from a LiDAR Point Cloud 2018, URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). — arXiv:1809.08495 [cs].
9. Griffiths D., Boehm J. Weighted Point Cloud Augmentation for Neural Network Training Data Class-Imbalance. *ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. Vol. XLII-2/W13. P. 981–987.
10. Griffiths D., Boehm J. SynthCity: A large scale synthetic point cloud. 2019, Jul. URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). arXiv:1907.04758v1 [cs.CV].
11. Дьяченко Р. А., Борисов С. Н. О возможности использования API геоинформационных систем. Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского : Сборник научных статей VIII Международной научно-практической конференции «Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского», Краснодар, 20–21 декабря 2017 года / КВБАУЛ им. Героя Советского Союза А. К. Серова. Краснодар : Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Дом – Юг», 2018. С. 299–302. EDN YPSAUK.
12. Ros G., Sellart L., Materzynska J., Vazquez D., Lopez A. M. The SYNTHIA Dataset: A Large Collection of Synthetic Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. P. 3234–3243.
13. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009): conference proceedings*. IEEE, 2009. P. 248–255.
14. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge. *International Journal of Computer Vision*. 2010. Vol. 88, No. 2. P. 303–338. — Jun.
15. Hackel T., Savinov N., Ladicky L., Wegner J. D., Schindler K., Pollefeys M. Semantic3D.net: A new Large-scale Point Cloud Classification Benchmark [Электронный ресурс] 2017. URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). arXiv:1704.03847 [cs].

16. D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, T. Tuytelaars, Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollar P., Zitnick C. L. Microsoft COCO: Common Objects in Context. Computer Vision ECCV 2014 : ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014. P. 740–755.

17. Roynard X., Deschaud J.-E., Goulette F. Paris-Lille-3D: A large and high-quality ground truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification [Электронный ресурс]. 2017, Nov. URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 12.11.2025). arXiv:1712.00032 [cs, stat].

REFERENCES

1. Community B. O. Blender — a 3D modelling and rendering package. (2018). B. O. Community. Blender Foundation.

2. Gschwandtner, M., Kwitt, R., Uhl, A., Pree, W. (2011). BlenSor: Blender Sensor Simulation Toolbox. In: Bebis, G., et al. Advances in Visual Computing. ISVC 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6939. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24031-7_20.

3. Wu, B., Wan, A., Yue, X., & Keutzer, K. (2018, May). SqueezeSeg: Convolutional neural nets with recurrent crf for real-time road-object segmentation from 3d lidar point cloud. In *2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 1887-1893). IEEE.

4. Dosovitskiy, Alexey & Ros, German & Codevilla, Felipe & López, Antonio & Koltun, Vladlen. (2017). CARLA: An Open Urban Driving Simulator. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.03938>.

5. Serna, Andrés & Marcotegui, B. & Goulette, François & Deschaud, Jean-Emmanuel. (2014). Paris-rue-Madame database: a 3D mobile laser scanner dataset for benchmarking urban detection, segmentation and classification methods. ICPRAM 2014 - Proceedings of the 3rd International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. 1-4.

6. Chang, A. X., Funkhouser, T., Guibas, L., Hanrahan, P., Huang, Q., Li, Z., ... & Yu, F. (2015). Shapenet: An information-rich 3d model repository. arXiv preprint arXiv:1512.03012.

7. Vallet, Bruno & Brédif, Mathieu & Serna, Andrés & Marcotegui, B. & Paparoditis, Nicolas. (2015). TerraMobility/iQmulus Urban Point Cloud Analysis Benchmark. Computers & Graphics. 49. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.03.004>.

8. Wu, Bichen & Zhou, Xuanyu & Zhao, Sicheng & Yue, Xiangyu & Keutzer, Kurt. (2018). SqueezeSegV2: Improved Model Structure and Unsupervised Domain Adaptation for Road-Object Segmentation from a LiDAR Point Cloud. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.08495>.

9. Griffiths, David & Boehm, Jan. (2019). Weighted Point Cloud Augmentation for Neural Network Training Data Class-imbalance. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLII-2/W13. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-981-2019>.

10. Griffiths, David & Boehm, Jan. (2019). SynthCity: A large scale synthetic point cloud. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.04758>.

11. Dyachenko R. A. (2018). *On the possibility of using API for geoinformation systems. In Sbornik nauchny`x statej VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchny`e chteniya imeni professora N.E. Zhukovskogo» [Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference "Scientific readings named after Professor N.E. Zhukovsky"]* (pp. 299-302). Krasnodar: LLL "Publishing House – South" Publ. [in Russian].

12. Ros, German & Sellart, Laura & Materzynska, Joanna & Vázquez, David & López, Antonio. (2016). *The SYNTHIA Dataset: A Large Collection of Synthetic Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes*. pp. 3234-3243. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.352>.

13. Deng, Jia & Dong, Wei & Socher, Richard & Li, Li-Jia & Li, Kai & Li, Fei-Fei. (2009). ImageNet: a Large-Scale Hierarchical Image Database. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 248-255. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848>.

14. Everingham, Mark & Van Gool, Luc & Williams, Christopher & Winn, John & Zisserman, Andrew. (2010). The Pascal Visual Object Classes (VOC) challenge. *International Journal of Computer Vision*. 88. pp. 303-338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>.

15. Hackel, T., Savinov, N., Ladicky, L., Wegner, J. D., Schindler, K., & Pollefeys, M. (2017). Semantic3d. net: A new large-scale point cloud classification benchmark. arXiv preprint arXiv:1704.03847.

16. Lin, TY. et al. (2014). Microsoft COCO: Common Objects in Context. In: Fleet, D., Pajdla, T., Schiele, B., Tuytelaars, T. (eds) Computer Vision – ECCV 2014. ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8693. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48

17. Roynard, Xavier & Deschaud, Jean-Emmanuel & Goulette, François. (2017). Paris-Lille-3D: A large and high-quality ground-truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification. The International Journal of Robotics Research. 37. <https://doi.org/10.1177/0278364918767506>.

Об авторах

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

Михаил Ярославович Брын – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная геодезия».

Дмитрий Андреевич Гура – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой кадастра и геоинженерии.

Константин Лефтерович Саввиди – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов.

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.

Dmitry A. Gura - PhD, Associate Professor, Acting Head of the Department of Cadastre and Geoen-gineering.

Konstantin L. Savvidi - Assistant Professor, Department of Industrial Process Automation.

Получено / Received 29.01.2026

Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2026

Принята к публикации / Accepted 15.05.2026

Научно-практическая статья/ Research article

УДК 528.531:681.783.24

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-37-45>

О возможности индивидуальной калибровки лазерных дальномеров электронных тахеометров

А. А. Шоломицкий¹✉, Н. С. Косарев¹, Б. Н. Ахмедов²

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

² Таджикский технический университет имени М. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

e-mail: sholomitskij@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме повышения точности измерения расстояний электронными тахеометрами в условиях ограниченной доступности высокоточного зарубежного оборудования. Показана возможность индивидуальной пользовательской калибровки лазерных дальномеров электронных тахеометров для улучшения их метрологических характеристик. Исследования проводились на высокоточном базисе пространственном эталонном Сибирского государственного университета геосистем и технологий, обеспечивающем точность определения длин не более 0,2 мм. Методика индивидуальной калибровки, заключающаяся в выявлении систематических погрешностей и составлении таблицы поправок для измеренных расстояний была апробирована на тахеометрах Leica TM30 и FOIF RTS005A. Результаты показывают, что систематические погрешности могут быть успешно учтены, что позволяет существенно повысить точность измерений. Для тахеометра FOIF RTS005A среднеквадратическая ошибка (СКО) измерения расстояний была уменьшена с ± 2 мм до $\pm 0,75$ мм. Для тахеометра Leica TM30 после калибровки была достигнута более высокая точность – до $\pm 0,25$ мм. Полученные результаты подтверждают, что индивидуально откалиброванные тахеометры могут быть эффективно использованы в автоматизированных системах геодезического мониторинга и для задач высокоточной промышленной геодезии. Авторами предложено реализовать данную методику калибровки в рамках программного геодезического комплекса «Визир 3D».

Ключевые слова: лазерный дальномер, электронный тахеометр, эталон, базис, калибровка, Leica TM30, FOIF RTS005A

Для цитирования:

Шоломицкий А. А., Косарев Н. С., Ахмедов Б. Н. О возможности индивидуальной калибровки лазерных дальномеров электронных тахеометров. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 37–45. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-37-45>

Methodology for individual calibration of EDM modules in electronic total stations

A. A. Sholomitskii¹✉, N. S. Kosarev¹, B. N. Akhmedov²

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

² M. Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Republic of Tajikistan

e-mail: sholomitskij@mail.ru

Abstract. The study addresses the critical challenge of enhancing distance measurement accuracy in electronic total stations amidst restricted access to high-end foreign instrumentation. The authors

demonstrate a viable approach for in-situ individual calibration of built-in laser rangefinders to enhance their metrological performance. The proposed methodology was validated using the high-precision spatial reference baseline at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, which provides a length determination uncertainty not exceeding 0.2 mm. The technique involves identifying systematic errors and generating corresponding correction tables for measured distances. Validation tests were performed using Leica TM30 and FOIF RTS005A total stations. The results confirm that compensating for systematic deviations substantially refines measurement precision. Specifically, the standard deviation (RMS) of distance measurements for the FOIF RTS005A decreased from ± 2.0 to ± 0.75 mm. For the Leica TM30, post-calibration accuracy reached ± 0.25 mm. The findings substantiate the applicability of individually calibrated total stations for automated geodetic monitoring systems and high-precision industrial surveying tasks. As a practical implementation pathway, the authors propose integrating this calibration algorithm into the "Vizir 3D" software-based geodetic complex.

Keywords: rangefinder, etalon, basis, calibration, Leica TM30, FOIF RTS005A

For citation:

Sholomitskii A. A., Kosarev N. S., Akhmedov B. N. (2026). Methodology for individual calibration of EDM modules in electronic total stations. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 37–45. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-37-45>

Введение

Развитие измерительных технологий, в частности, появление лазерных трекеров, привело к пересмотру места электронных тахеометров в сфере промышленной метрологии. Это выразилось в прекращении производства специализированных метрологических тахеометров (таких как серия TDA/TDRA от Leica), которые обеспечивали точность измерений до 0,2 мм на коротких расстояниях [1–3].

В текущих условиях парк высокоточного метрологического оборудования в России представлен ограниченным количеством электронных тахеометров, обеспечивающих высокую точность измерений (например, тахеометр Leica TM50 в составе государственного эталона длины [4, 5]), и практически лишен современных лазерных трекеров швейцарского и американского производства из-за санкционных ограничений. Конечно, до введения санкционных ограничений ряд компаний приобрели некоторое количество лазерных трекеров, но их количество недостаточно для решения всех задач промышленной геодезии [6–11].

Наряду с проблемой доступности, лазерные трекеры имеют существенный недостаток – ограничение по дальности измерения (до 160 м). Это не позволяет решать ряд кри-

тически важных задач промышленной геодезии, требующих обеспечения точности 0,1–0,2 мм на линиях длиной 200–300 м для создания высокоточных сетей и мониторинга крупногабаритного оборудования [12,13]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на повышение точности измерений электронными тахеометрами, которые регулярно ведутся сотрудниками кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела на базе пространственном эталонном СГУГиТ им. О. П. Сучкова [5, 14, 15], который на интервалах до 192 м был измерен четырежды с помощью лазерного трекера Leica AT 403. Среднеквадратические погрешности измерения расстояний, указанные в паспорте трекеров Leica AT 400-й серии, составляют ± 10 мкм. Осредненные расстояния, полученные за четыре серии измерений, использовались затем в качестве эталонных значений.

В статье [15] показана возможность индивидуальной калибровки лазерного дальномера электронного тахеометра Leica TM30. Отмечено, что СКО взятия отсчетов этим тахеометром на расстоянии до 200 м не превышает 0,2 мм, при этом поправки в измеренные длины при измерениях на призму имеют закономерный характер и могут быть учтены в дальнейшем. В рамках данной статьи авторы провели дополнительные исследования не только элек-

тронного тахеометра Leica TM30, но и китайского тахеометра FOIF RTS005A, на возможность проведения их индивидуальной калибровки.

Методика индивидуальной калибровки лазерных дальномеров электронных тахеометров. Методика индивидуальной калибровки осуществляется в два этапа. На первом этапе из серийных высокоточных инженерных тахеометров выбирается прибор с лазерным дальномером, который дает стабильные отсчеты с наименьшей средней квадратической погрешностью измерения расстояний. Затем этот тахеометр поверяется на высокоточном стенде (например [5, 16]), который в свою очередь калибруется интерферометром [17]. При калибровке определяются систематические ошибки измерения расстояний конкретным электронным тахеометром. Эти систематические ошибки в виде таблицы поправок в измеренные расстояния записываются в энергонезависимую память контроллера лазерного дальномера. На втором этапе при измерении расстояний в контроллере вычисляются интерполированные поправки, которые затем вводятся в измеренное расстояние.

Данная методика индивидуальной калибровки применялась для электронных тахеометров серии TDA/TDRA [2], которые становились эталонами и использовались для поверки базисов и серийных электронных тахеометров. Стоит отметить, что аналогичный подход используется для российских дальномеров, выпускаемых компанией ООО «Синтэла» [18].

С появлением аппаратно-программных измерительных комплексов [19] и онлайн-методов измерений появилась возможность индивидуальной калибровки лазерных дальномеров самим пользователем, конечно при выполнении нескольких условий: наличием электронного тахеометра с малой средней квадратической погрешностью взятия отсчетов и доступом к высокоточному эталонному базису. В этом случае можно определить отклонения измеренных длин от эталонных и сформировать таблицу поправок. Используя эту таблицу, автоматически в программе будут вычисляться поправки путем интерполяции и вводиться в измеренную длину линий.

Такая методика индивидуальной калибровки является более универсальной и не требует обращения к производителю и перепрограммирования контроллера, но и ответствен-

ность за правильность калибровки тоже ложится на пользователя электронного тахеометра.

Апробация методики индивидуальной калибровки лазерных дальномеров электронных тахеометров. Апробация методики индивидуальной калибровки осуществлялась на базе пространственном эталонном СГУГиТ им. О. П. Сучкова [20], точность определения длин которого с первого до десятого пункта составляет не более 0,2 мм. Методика измерения эталонных длин и полученная точность приведены в работе [5].

Измерения выполнялись последовательно с первого до десятого пункта на сферический отражатель диаметром 32 мм (рисунок 1, а), имеющий постоянную, равную $-22,0$ мм (рисунок 1, б) в 2023, 2024 и 2025 гг.



а) установка тахеометра



б) измерение на сферическую призму $\varnothing 32$ мм

Рис. 1. Проведение измерений на базе пространственном эталонном СГУГиТ им. О. П. Сучкова

В исследовании методики индивидуальной калибровки участвовали два электронных тахеометра Leica TM30 и FOIF RTS005A, для кото-

рых по отклонениям от среднего были рассчитаны СКП измерения длины для каждого эталонного расстояния из 160 измерений (рис. 2).

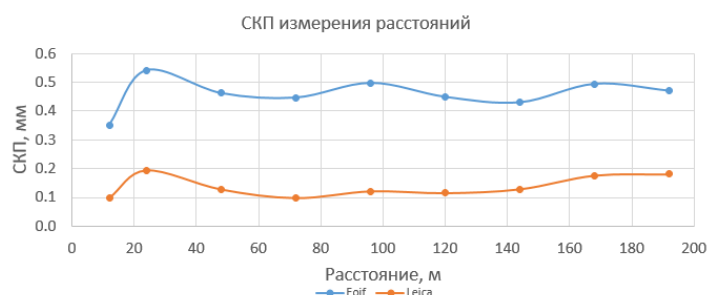


Рис. 2. СКП измерения длины для каждого эталонного расстояния

Исследование точности измерения расстояний электронным тахеометром FOIF RTS005A

Тахеометром FOIF RTS005A были выполнены двенадцать серий измерений в отражательном режиме. Каждая точка измерялась многократно при круге лево (КЛ) и при круге право (КП). Каждый раз до начала измерений определялись параметры атмосферы, которые затем учитывались в тахеометре.

Далее для каждой серии измерений рассчитывались поправки как отклонения измеренных длин от эталонных (рис. 3).



Рис. 3. Графики отклонения измеренных длин от эталона (красной пунктирной линии обозначено среднее отклонение)

Как видно из рис. 3, все серии измерений имеют отрицательную величину, что предполагает наличие некоторой систематической составляющей, которую в дальнейшем можно учесть. Для этого из каждой 12 серий измерений были вычтены средние отклонения по каждой линии (рис. 4).

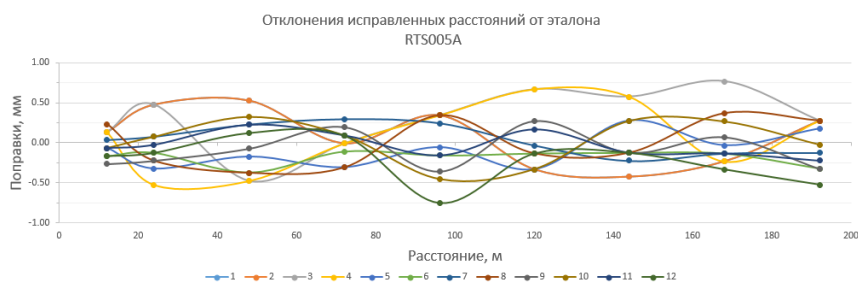


Рис. 4. Отклонения исправленных длин от эталона

Отклонения, показанные на рис. 4, имеют разные знаки, что характерно для случайных ошибок измерений, при этом диапазон отклонений находится в пределах от -0,75 до 0,75 мм.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- подтверждаются заявленные производителем технические характеристики измерения расстояний электронным тахеометром FOIF RTS005A;

- при стабильной работе лазерного дальномера можно учесть систематические погрешности измерений и повысить точность измерения расстояний с ± 2 мм до $\pm 0,75$ мм;

- для подтверждения полученных результатов требуются дополнительные исследования лазерного дальномера электронного тахеометра FOIF RTS005A в различных условиях.

Исследование точности измерения расстояний электронным тахеометром LEICA TM30

Электронным тахеометром Leica TM30 было выполнено восемь серий измерений в отражательном режиме. Каждая точка измерялась многократно при круге лево (КЛ) и при круге право (КП). Каждый раз до начала измерений определялись параметры атмосферы, которые затем учитывались в тахеометре.

Далее для каждой серии измерений рассчитывались поправки как отклонения измеренных длин от эталонных (рис. 5).

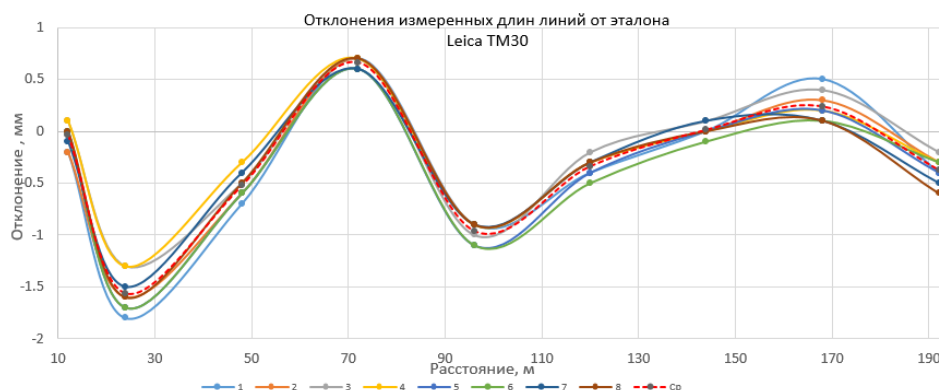


Рис. 5. Графики отклонения измеренных длин от эталона (красной пунктирной линии обозначено среднее отклонение)

Графики на рис. 5 показывают, что отклонения небольшие и носят систематический характер, который в дальнейшем можно учесть. Для этого из каждой восьми серий измерений были вычтены средние отклонения по каждой линии (рис. 6).

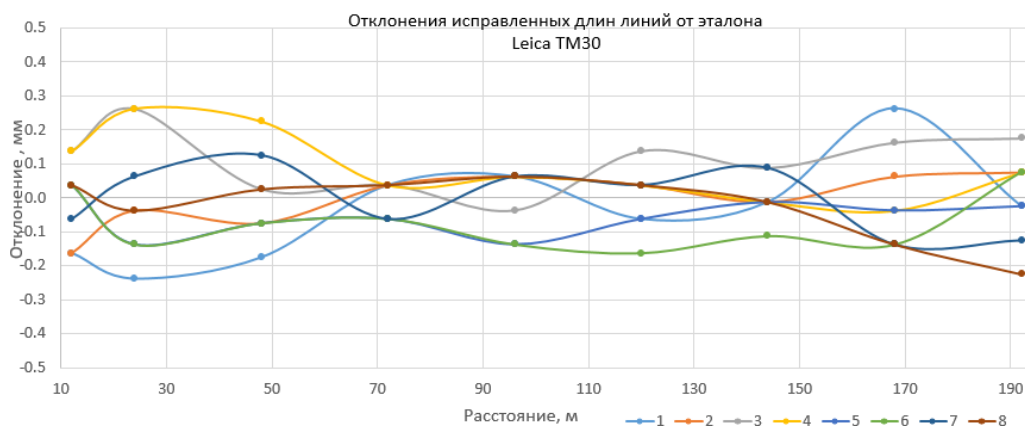


Рис. 6. Отклонения исправленных длин от эталонных

Отклонения, показанные на рис. 6, имеют разные знаки, что характерно для случайных ошибок измерений, при этом диапазон отклонений находится в пределах от $-0,25$ до $0,25$ мм, а в среднем менее $\pm 0,2$ мм.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- подтверждаются заявленные производителем технические характеристики измерения расстояний электронным тахеометром Leica TM30;

- при стабильной работе лазерного дальномера можно учесть систематические погрешности измерений и повысить точность измерения расстояний с ± 2 мм до $\pm 0,25$ мм;

Заключение

Исследования электронных тахеометров FOIF RTS005A и Leica TM30 на базе пространственном эталонном СГУГиТ им. О. П. Сучкова показали, что оба тахеометра имеют систематические отклонения при измерении эталонных длин базиса, и есть возможность учесть систематические ошибки измерений при индивидуальной калибровке каждого из этих тахеометров при выполнении онлайн-геодезических измерений. Так, средняя квадратическая ошибка измерения расстояний электронным тахеометром FOIF RTS005A на расстояниях до 200 м составляет

$\pm 0,75$ мм. Для электронного тахеометра Leica TM30, при индивидуальной калибровке, можно довести среднюю квадратическую погрешность измерения расстояний до $\pm 0,2$ мм.

По результатам исследований можно с уверенностью говорить о том, что областью применения электронного тахеометра FOIF RTS005A могут быть автоматизированные системы геодезического мониторинга (АСГМ) объектов критической инфраструктуры [21]. В свою очередь, электронные тахеометры Leica TM30, кроме мониторинга, можно использовать также для высокоточной промышленной геодезии.

Остается открытым вопрос о стабильности работы исследуемых дальномеров, что в свою очередь будет определять частоту выполнения индивидуальной калибровки. При этом индивидуальную калибровку можно использовать при онлайн-геодезических измерениях программным комплексом «Визир 3D» [19].

Для индивидуальной калибровки электронных тахеометров на расстояниях более 200 м необходимо создание базиса большой длины, измеренного с высокой точностью. Хотя для многих объектов автоматизированного геодезического мониторинга и высокоточной выверки промышленного оборудования подходит индивидуальная калибровка дальномеров на базисе до 200 м [12, 13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сайт компании Leica Geosystems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leica-geosystems.com>.
2. Высокоточный тахеометр Leica TDRA6000 [Электронный ресурс]/ – Режим доступа: <https://www.promgeo.com/equipment/total-stations/total-station-leica-tdra6000/>.
3. Иванов М. А., Стёпкин А. Ю., Шкавера К. Н. Исследование точностных характеристик тахеометров и лазерной рулетки фирмы «Leica». Записки Горного института. 2002. № 1, Том 150. С. 64–67.
4. Shchipunov A. N., Tatarenkov V. M., Denisenko O. V., Sil'vestrov I. S., Fedotov V. N., Vasil'ev M. Yu., Sokolov D. A. A set of standards for support of the uniformity of measurements of length in the range above 24 m: current state and prospects for further development. Measurement Techniques. – 2019. – Vol. 57 (11). – P. 1228–1232. – DOI: 10.1007/s11018-015-0610-9.
5. Косарев Н. С., Шоломицкий А. А., Ханзаян М. А., Сердаков Л. Е., Крапивин В. С., Сучков И. О. Результаты сравнения длин линий на базисе пространственном эталонном СГУГиТ. Геодезия и картография. – 2024. – № 2. – С. 12–20. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-12-20.
6. Полянский А. В., Крапивин В. С., Буренков Д. Б., Вонда Е. С., Сердаков Л. Е. О геодезическом обеспечении создания комплекса «Скиф». Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 67–76. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-5-67-76.

7. Ефремкин О. С., Шапошников С. Н. Определение отклонений внутреннего контура цилиндрических конструкций лазерным трекером // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 6-2 (86). – С. 284–288.
8. Ерошков В. Ю. Использование мобильной координатно-измерительной машины на базе лазерного трекера для аттестации испытательного оборудования // Газотурбинные технологии. – 2019. – № 5 (164). – С. 26–30.
9. Брежнев В. Г., Колесникова Ю. В. Совершенствование методики контроля геометрических параметров воздушного судна с помощью лазерного трекера // Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в вузе и школе. – 2022. – № 35. – С. 794–801.
10. Сазонникова Н. А., Илюхин В. Н., Сурудин С. В., Мезенцев Д. А. Контроль оснастки для инкрементального формообразования с помощью лазерного трекера // Динамика и виброакустика. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 30–39. – DOI: 10.18287/2409-4579-2021-7-4-30-39.
11. Кузин А. А., Петров В. В., Пефтиев А. А. Геодезическое обеспечение выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа с применением лазерных трекеров. Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 22–32. – DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.
12. Mogilny S. G., Sholomitskii A. A., Sotnikov A. L. Technical Audit of Rotary Aggregates. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, Volume II, p. 541 – 550 https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_57
13. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Лунев А. А., Сотников А. Л., Ватралик Э. М., Фролов И. С. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ. Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 3 (30). – С. 12–25.
14. Шоломицкий А. А., Косарев Н. С., Сердаков Л. Е., Лагутина Е. К., Сучков И. О. Исследование фазового светодальномера электронного тахеометра FOIF RTS005A на базисе пространственном эталонном СГУГиТ // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Том 29 (1). – С. 54–64. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-54-64.
15. Шоломицкий А. А., Косарев Н. С., Никонов А. В., Сердаков Л. Е., Соболева Е. Л. Исследование точности измерения длин лазерными дальномерами электронных тахеометров. Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 59–68. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-59-68.
16. Райшман С. Аккредитация вызывает доверие. Reporter 63 Периодическое издание Leica Geosystems. Русская версия. Leica Geosystems AG, Хеебрютг (Швейцария) Сентябрь 2010. – С. 6–7.
17. Lechner J., Kosarev N. S., Trevoho I. S. Conversion of units of length from the Czech state standard to the geodetic baseline Javoriv. Acta Polytechnica. – 2022. – Vol. 62(6). – P. 618–622. DOI: 10.14311/AP.2022.62.0618.
18. Сайт ООО «СИНТЭЛА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lasertech-nics.org/SINTELA_RTS362.pdf.
19. Сайт продукта «Визир 3D» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/vizir-3d>.
20. Karpik A. P., Kosarev N. S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Y. Operational experience of GNSS receivers with Chip Scale Atomic Clocks for baseline measurements. Geodesy and Cartography. – 2018. – Vol. 44(4). – P. 140–145. DOI: 10.3846/gac.2018.4051.
21. 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.

REFERENCES

1. Leica Geosystems website. Retrieved from <https://leica-geosystems.com>
2. High-precision total station Leica TDRA6000. Retrieved from <https://www.promgeo.com/-equipment/total-stations/total-station-leica-tdra6000/>
3. Ivanov M.A., Stepkin A.Yu., & Shkavera K.N. (2002) Study of the accuracy characteristics of tacheometers and laser tape measures from Leica. *Notes of the Mining Institute*, 150 (1), 64–67. [in Russian].
4. Shchipunov, A. N., Tatarenkov, V. M., Denisenko, O. V., Sil'vestrov, I. S., Fedotov, V. N., Vasil'ev, M. Yu., & Sokolov, D. A. (2015). A set of standards for support of the uniformity of meas-

urements of length in the range above 24 m: current state and prospects for further development. *Measurement Techniques*, 57(11), 1228-1232. DOI: 10.1007/s11018-015-0610-9.

5. Kosarev N. S., Sholomitskii A. A., Khanzadyan M. A., Serdakov L. Ye., Krapivin V. S., & Suchkov I. O. (2024) Line lengths comparison results on the spatial reference basis SGUGIT. *Geodezia i Kartografiya [Geodesy and cartography]*, 85 (2), 12–20 [in Russian]. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-12-20

6. Polyansky A.V., Krapivin V.S., Burenkov D.B., Vonda E.S., & Serdakov L.E. (2022) The alignment strategy for the SKIF synchrotron radiation source. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(5), 67-76. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-5-67-76

7. Efremkin O.S., & Shaposhnikov S.N. (2018) Determination of deviations of the internal contour of cylindrical structures by a laser tracker. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk]*, 2018, 20 (6-2), 284-288 (in Russian).

8. Eroshkov V.Yu. (2019) Using a mobile coordinate measuring machine based on a laser tracker for certification of testing equipment. *Gas turbine technologies [Gazoturbinnye tekhnologii]*, 2019, 5 (164), 26-30 (in Russian).

9. Brezhnev V.G., & Kolesnikova Yu.V. (2022) Improving methods for monitoring aircraft geometric parameters using a laser tracker. *Modern problems of linguistics and methods of teaching the Russian language at universities and schools [Sovremennye problemy lingvistiki i metodiki prepodavaniya russkogo yazyka v VUZe i shkole]*, 2022, 35, 794-801 (in Russian).

10. Sazonnikova N.A., Ilyuhin V.N., Surudin S.V., & Mezencev D.A. (2021) Control of equipment for incremental forming using a laser tracker. *Dynamics and Vibroacoustics [Dinamika i vibroakustika]*, 2021, 7(4), 30-39. DOI: 10.18287/2409-4579-2021-7-4-30-39 (in Russian).

11. Kuzin A.A., Petrov V.V., & Peftiev A.A. (2023) Geodetic supply of alignment the reflecting surface's shape of the main mirror of a radio telescope using laser trackers. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(1), 22-32. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.

12. Mogilny, S. G., Sholomitskii, A. A., & Sotnikov, A. L. (2019) Technical Audit of Rotary Aggregates. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, Volume II*, p.541–550 https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_57

13. Mogilny S.G., Sholomitskii A.A., Lunev A.A., Sotnikov A.L., Vatralik E.M., & Frolov I.S. (2012) Improving technologies for monitoring the position and alignment of continuous caster equipment. *Metallurgical processes and equipment*, 3(30), 12–25 [in Russian]

14. Sholomitskii, A. A., Kosarev, N. S., Serdakov, L. E., Lagutina, E. K., & Suchkov, I. O. (2024). Study of the phase rangefinder of the electronic total station FOIF RTS005A on the SSUGT spatial reference basis. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(1), 54–64. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-54-64 [in Russian].

15. Sholomitskii, A. A., Kosarev, N. S., Nikonov, A.V., Serdakov, L. E., & Soboleva, E. L. (2024). The length measurement accuracy research by laser range finders of electronic total stations. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(5), 59–68. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-59-68 [in Russian].

16. Raishman S. (2010) Accreditation Inspires Trust. Reporter 63. Leica Geosystems, 6-7.

17. Lechner, J., Kosarev, N. S., & Trevoho, I. S. (2022) Conversion of units of length from the Czech state standard to the geodetic baseline Javoriv. *Acta Polytechnica*, 62(6), 618-622. DOI: 10.14311/AP.2022.62.0618

18. Website of SINTELA LLC. Retrieved from https://lasertechnics.org/SINTELA_RTS362.pdf [in Russian]

19. Product website "Vizir 3D". Retrieved from <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/vizir-3d>.

20. Karpik, A. P., Kosarev, N. S., Antonovich, K. M., Ganagina, I. G., & Timofeev, V. Y. (2018). Operational experience of GNSS receivers with Chip Scale Atomic Clocks for baseline measurements. *Geodezia i Kartografiya [Geodesy and cartography]*, 44(4), 140-145. DOI:10.3846/gac.2018.4051

21. Kosarev, N. S. (2025) On the necessity of creating Russian software for automated geodetic monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30(3), 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14 [in Russian].

Об авторах

Андрей Аркадьевич Шоломицкий – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Николай Сергеевич Косарев – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Бахтиёр Назруллоевич Ахмедов – кандидат технических наук, ассистент кафедры инженерной геодезии, картографии и маркшейдерского дела.

Author details

Andrey A. Sholomitskii – D.Sc, Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

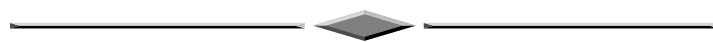
Nikolai S. Kosarev – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Bakhtiyor N. Akhmedov – PhD, Assistant, Department of Engineering Geodesy, Cartography and Mine Surveying.

Получено / Received 19.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 09.10.2025

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026



Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК [528.8:519.651]+631.4

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-46-55>

Аппроксимация временных рядов NDVI сплайнами и рядом Фурье для мультисенсорной классификации пахотных земель Хабаровского края

Л. В. Илларионова^{1✉}, А. С. Степанов², К. Н. Дубровин^{1✉}, Е. А. Фомина¹

¹ Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Российская Федерация

² Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
с. Восточное, Хабаровский край, Российская Федерация

e-mail: nobforward@gmail.com

Аннотация. Объединение данных разных спутниковых систем используется для повышения точности классификации пахотных земель. Применение сезонных временных рядов мультиспектральных данных Sentinel-2, Landsat-8/9 на региональном уровне может быть затруднено из-за высокой разреженности данных, обусловленной облачными явлениями. В статье рассмотрен подход к подготовке непрерывных временных рядов NDVI, основанный на аппроксимации кубическим сплайном (SP) и рядом Фурье (DF). Для пахотных земель Хабаровского края в период со 121-го по 296-й календарный день 2022–2024 гг. были построены аппроксимированные сезонные временные ряды NDVI по данным спутников Sentinel-2 и Landsat-8/9, с помощью ЦКП «ИКИ-мониторинг», рассчитаны значения еженедельных композитов NDVI по данным Метеор-М. В качестве входных параметров для классификации пяти классов (соя, зерновые культуры, гречиха, многолетние травы, залежь) пахотных земель использовались наборы данных значений аппроксимированных рядов NDVI по данным спутников Sentinel-2 и Landsat-8/9, приведенных к разрешению 60 м, а также синхронизированных данных по трем спутникам. Классификация проводилась на основе метода случайного леса (Random Forest). По результатам трехкратной кросс-валидации было установлено, что достоверных различий в общей точности (ОА) классификации при применении SP и DF не выявлено: при этом значимое влияние на точность оказывает год наблюдения и выбранный датасет. Общая точность классификации пахотных земель Хабаровского края на основе мультисенсорных данных (95,0 %) достоверно больше, чем с использованием данных Landsat (90,4 %), и незначительно выше общей точности для Sentinel (94,3 %). Значения F1-меры для разных классов пахотных земель также зависели от классифицируемого года, и в большинстве случаев применение синхронизированных данных трех спутников демонстрировало более высокие значения показателя в сравнении с отдельными спутниками. По результатам проведенной классификации в 2022–2024 гг. были построены карты-схемы пахотных земель Хабаровского края.

Ключевые слова: классификация, аппроксимация, пахотные земли, машинное обучение, спутниковый мониторинг

Для цитирования:

Илларионова Л. В., Степанов А. С., Дубровин К. Н., Фомина Е. А. Аппроксимация временных рядов NDVI сплайнами и рядом Фурье для мультисенсорной классификации пахотных земель

Хабаровского края. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 46–55. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-46-55>

Spline and Fourier-based approximation of NDVI time series for multisensor cropland classification in Khabarovsk Krai

L. V. Illarionova¹, A. S. Stepanov², K. N. Dubrovin^{1✉}, E. A. Fomina¹

¹ Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

² Far Eastern Agriculture Research Institute, Vostochnoe, Khabarovsk region, Russian Federation

e-mail: nobforward@gmail.com

Abstract. Fusing multisource satellite observations significantly improves cropland classification accuracy. However, the construction of dense seasonal time series from optical sensors such as Sentinel-2 and Landsat-8/9 at a regional scale is frequently impeded by persistent cloud cover, resulting in substantial temporal gaps. The study addresses data sparsity by reconstructing continuous NDVI trajectories using cubic spline interpolation (SP) and Fourier decomposition (DF). The authors derived approximated seasonal NDVI profiles for arable lands in Khabarovsk Krai for calendar days 121–296 across the 2022–2024 period based on Sentinel-2 and Landsat-8/9 imagery. To augment the dataset, weekly NDVI composites were generated from Meteor-M satellite data via the IKI-Monitoring Shared Research Facility. Feature sets for classifying five crop types (soybeans, cereals, buckwheat, perennial grasses, and fallow land) included SP- and DF-reconstructed NDVI values resampled to 60 m resolution, both individually and within a synchronized multi-sensor framework combining all three satellites. Classification was implemented using the Random Forest algorithm. Three-fold cross-validation revealed no statistically significant difference in Overall Accuracy (OA) between the two reconstruction methods; however, performance varied considerably depending on the observation year and input dataset. The fused multi-sensor approach achieved an OA of 95.0 %, representing a marked improvement over single-sensor inputs: +4.6 % compared to Landsat-only (90.4 %) and +0.7 % compared to Sentinel-only (94.3 %). F1-scores for individual classes also demonstrated annual variability, with the combined three-satellite model consistently outperforming single-source configurations. Leveraging these results, high-resolution annual maps of cropland distribution and composition for Khabarovsk Krai covering the 2022–2024 growing seasons were created.

Keywords: classification, fitting, cropland, machine learning, satellite monitoring

For citation:

Illarionova L. V., Stepanov A. S., Dubrovin K. N., Fomina E. A. (2026). Spline and Fourier-based approximation of NDVI time series for multisensor cropland classification in Khabarovsk Krai. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 46–55. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-46-55>

Введение

Одновременное использование данных различных спутниковых систем является перспективным направлением для повышения точности классификации культур, особенно в регионах с большим количеством облачных дней в ходе периода вегетации [1].

Возможность создания гармонизированных временных рядов Landsat-7/8 и Sentinel-2 была продемонстрирована, например в работе [2]. Коэффициент детерминации между гармонизированными рядами составил 0,92.

Полученные в результате объединения спутниковых данных Landsat-8 и Sentinel-2 временные ряды NDVI (нормализованного разностного индекса вегетации) использовались для картографирования пахотных земель в Германии (выделялись 24 класса растительности) в 2017–2019 гг. [3]. Для получения 5-дневных композитов использовался свёрточный фильтр. Точность классификации составила 67–70 %.

Помимо использования готовых гармонизированных наборов данных разных спутников, в качестве одного из подходов к их одновременному использованию применяется ко-

регистрация снимков различных спутников с формированием единого временного ряда. В провинции Хэйлунцзян (Китай) с использованием снимков Sentinel-2 и GaoFen-1 производилось распознавание посевов кукурузы, риса и сои [4]. По аналогии с готовыми рядами Sentinel/Landsat строились единые временные ряды. При объединении данных двух спутников значение F1-меры для класса сои составило 0,92 в 2017 г. и 0,69 в 2018 г. (что на 0,02 выше, чем при использовании только снимков Sentinel-2).

Другой альтернативой может выступать разработка многошаговой методики, основанной на использовании методов машинного обучения для анализа результатов классификации, то есть объединение результатов выполняется не на уровне спутниковых данных, а на уровне меток классов. Пример такой методики (Parallel PCA-Cascaded) представлен в работе [5]. Для построения итогового классификатора использовались результаты классификации по данным Sentinel-1, Sentinel-2 и Landsat-8/9. Общая точность классификации пахотных земель с использованием обобщающего классификатора составила 96 %, что на 14 % больше, чем при использовании лучшего из классификаторов на основе данных одной спутниковой системы (Landsat-8/9).

При объединении данных разных спутниковых систем, в частности временных рядов индексов вегетации, часто возникают проблемы, связанные с разреженностью данных, разными датами съемки спутников, что требует восстановления потерянных и расчета ежедневных или еженедельных значений.

В настоящее время применяются разные подходы, основанные как на аппроксимации нелинейными функциями, так и на применении сплайн-интерполяции. В частности, широко используются методы на основе рядов Фурье: их преимуществом является способность отражать периодичность сезонного цикла, однако они могут быть недостаточно гибкими для описания хода вегетации различных культур [6].

Сплайновое сглаживание (spline smoothing, SP) является одним из пяти наиболее распространенных методов восстановления целостности временных рядов NDVI

наряду с фильтром Савицкого – Голея, локально взвешенной регрессией, асимметричной функцией Гаусса и двойной логистической функцией. Исследования показывают, что ни один метод не является универсальным [7].

Кубические сплайны продемонстрировали высокую эффективность в задачах классификации культур. В Институте проблем передачи информации имени А. А. Харкевича РАН был разработан метод, основанный на кубической сплайн-интерполяции временных рядов NDVI со спутника Sentinel-2 для последующего извлечения признаков алгоритмом UMAP и классификации методом k ближайших соседей [8]. Использование UMAP для снижения размерности привело к 1,5-кратному увеличению качества классификации кукурузы, подсолнечника, пшеницы и сои по средней F1-мере по сравнению с использованием данных исходной размерности.

В работе, выполненной в Самарском национальном исследовательском университете, производилась оценка различных функций для решения задачи ранней идентификации культур и установлено, что кубический сплайн является лучшей функцией и может использоваться для построения временных рядов NDVI [9].

Периодические сплайны также показали перспективность для интерполяции NDVI, особенно с учетом циклического характера вегетационных сезонов. В работе [10] представлен алгоритм на основе кубических сплайнов для обработки композитов MODIS, который позволяет получать значения в любой точке временного ряда с заданным интервалом.

Сравнительный анализ методов сглаживания проводился в многочисленных исследованиях. В научной литературе представлены подробные обзоры доступных методов восстановления и сглаживания временных рядов данных дистанционного зондирования [11, 12]. Китайские исследователи сравнили методы сглаживания временных рядов для извлечения фенологических особенностей пастбищных трав в весенний период на Тибетском плато и обнаружили высокую вариацию точности методов [13]. В публикации [14] отмечено, что применение фильтров и сплайнов может обес-

печивать баланс между сглаживанием ряда и сохранением локальных вариаций.

Для российского Дальнего Востока с характерным муссонным климатом, обеспечивающим облачность в период вегетации, большое значение имеет подготовка данных разных спутниковых систем с целью формирования объединённого набора данных для попиксельной классификации. Наряду с данными Sentinel и Landsat, в настоящее время в России востребованы данные «Метеор-М» с приборами КМСС для дистанционной оценки характеристик земной поверхности и оперативного мониторинга растительного покрова России. Ежедневные композиты Метеор-М использовались в том числе и для распознавания посевов на Дальнем Востоке [15].

В данной работе предлагается подход объединения данных спутниковых систем, при котором рассчитанные значения индекса вегетации каждого спутника являются независимыми параметрами корегистрированных пикселей на каждый день периода. Таким образом, в дополнение к имеющимся композитам Метеор-М от ИКИ РАН для Дальнего Востока необходимо рассчитать ежедневные значения временных рядов спутников Sentinel-2 и Landsat-8/9 и привести их к пространственному разрешению 60 м.

Целью настоящего исследования является сравнительная оценка эффективности аппроксимации временных рядов NDVI сплайнами и DF для классификации сельскохозяйственных культур Хабаровского края на основе данных спутников Landsat-8/9, Sentinel-2, а также мультисенсорной классификации с использованием композитов Метеор-М.

Область исследования и источники данных

Рассматриваемые в работе сельскохозяйственные угодья находились в юго-восточной части Хабаровского района Хабаровского края, на правом берегу реки Амур в окрестностях г. Хабаровска. Временной охват исследования составил три вегетационных сезона 2022–2024 гг.

В качестве наземных данных использовалась информация о структуре пахотных земель (собранная в ходе полевых экспедиций

и полученная от сельскохозяйственных производителей): всего рассматривались 421 поле в 2022 г., 462 поля в 2023 г. и 996 полей в 2024 г. Все участки были сгруппированы в пять классов: поля с посевами сои (20 384 га), залежные (неиспользуемые) земли (7 001 га), участки под многолетними травами (2 624 га) и зерновыми культурами (пшеница, овёс и ячмень) (4 621 га), а также поля с посевами гречихи (1 422 га). Следует отметить, что в агроклиматических условиях Хабаровского края возделываются исключительно яровые культуры, при этом посевная кампания начинается в конце апреля – начале мая, а уборочные работы завершаются к концу октября.

Для анализа исследуемого района был сформирован набор спутниковых данных, включающий снимки трёх спутниковых систем. Со спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B были получены 400 мультиспектральных изображений уровня обработки 2A с пространственным разрешением 20 м. Рассматривались 94 мультиспектральных снимка уровня атмосферной коррекции 2A, полученных со спутников Landsat-8/9 с разрешением 30 м. Также использовались ежедневные композитные изображения Метеор-М (пространственное разрешение 60 м) в ближнем инфракрасном (NIR) и красном (RED) диапазонах за период с 121 по 269 календарные дни года (с начала мая по конец сентября). Данные предоставлены Центром коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных Института космических исследований РАН [16].

Предобработка спутниковых данных

Предварительная обработка спутниковых изображений включала стандартную процедуру маскирования облачности. Для снимков Sentinel-2 применялся продукт «Слой классификации сцен» (SCL, Scene Classification Layer), для изображений Landsat-8/9 использовался продукт «Слой оценки качества пикселей» (QA_PIXEL).

Для более чем половины снимков Sentinel и Landsat облачное покрытие превышало 50 % (с учетом теней от облаков и дымки). Количество малооблачных снимков (менее

20 % маскированных пикселей) для Sentinel-2 в 2022 г. составило 13 (21 % от общего числа), в 2023 г. – 15 (25 %), в 2024 г. – 14 (24 %). Количество безоблачных снимков (менее 5 % маскированных пикселей), которые можно использовать без восстановления данных, было невысоким и неравномерно распределенным по временной шкале вегетационного сезона. В 2022 г. этому условию удовлетворяли 8 снимков Sentinel-2, в 2023 и 2024 гг. – по 11 снимков. Безоблачных и малооблачных снимков было недостаточно для построения недельных композитов NDVI по данным Sentinel. Из-за меньшего количества снимков Landsat (от 14 до 18 снимков за сезон) проблема разреженности данных проявлялась в большей степени: за три года получено пять безоблачных и шесть малооблачных снимков.

На основе многоспектральных данных производилось вычисление NDVI. После удаления облачных пикселей на каждом снимке, для каждого пикселя в границах сельскохозяйственных полей были построены сезонные вре-

менные ряды вегетационного индекса NDVI за каждый календарный год (2022, 2023 и 2024 гг.). Ряды имели разное число значений, которые соответствовали разным календарным датам для разных лет наблюдения. Для обработки изображений использовались библиотеки Rasterio (<https://rasterio.readthe-docs.io/>) и Osgeo (www.osgeo.org) языка Python.

Методы аппроксимации временных рядов NDVI

Для рассчитанных значений временных рядов NDVI за каждый календарный год со спутников Sentinel и Landsat проводилась аппроксимация данных с использованием кубических сплайнов. Кубическая кривая В-сплайна $C(t)$ с нормализованным параметром $t \in [0, 1]$ определялась четырьмя узлами (контрольными точками – известными значениями функции) b_0, b_1, b_2, b_3 . Многочлен третьей степени вычислялся по следующей формуле:

$$C(t) = \frac{1}{6}((-b_0 + 3b_1 - 3b_2 + b_3)t^3 + (3b_0 - 6b_1 + 3b_2)t^2 + (-3b_0 + 3b_2)t + (b_0 + 4b_1 + b_2)). \quad (1)$$

Кусочно-кубический В-сплайн образован набором узлов, и каждые четыре последовательных узла определяют кубический участок кривой [17].

Также аппроксимация временных рядов NDVI проводилась с применением первых членов разложения в ряд Фурье (DF), как было описано ранее [18]:

$$f = a_0 + a_1 \cdot \cos(xw) + b_1 \cdot \sin(xw) + a_2 \cdot \cos(2xw) + b_2 \cdot \sin(2xw), \quad (2)$$

где a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 – числовые коэффициенты.

Таким образом в период со 121 по 296 календарный день года были рассчитаны ежедневные значения NDVI методами SP и DF для спутников Sentinel и Landsat.

На основе ежедневных композитных изображений каналов NIR и RED спутника Метеор-М по формуле (1) были вычислены ежедневные значения индекса NDVI. С помощью метода скользящего окна рассчитаны недельные пиксельные композиты со 121 по 296 календарный день года для спутников Sentinel, Landsat и Метеор-М.

Также были созданы обобщенные датасеты за 2022–2024 гг. на основе синхронизированных данных по всем спутникам (Landsat, Sentinel, Метеор-М). Для этого была проведена автоматизированная корегистрация (выбор точки отсчета и координатной си-

стемы) и изменение разрешения, что привело к синхронизации координат пикселей на разных снимках. Все снимки преобразовывались в систему координат EPSG:4326 (WGS 84). Разрешение изменялось методом билинейной интерполяции. Для каждого корегистрированного пикселя (приведенного к координатной сетке Метеор-М с разрешением 60 м) был сформирован набор из трёх еженедельных значений NDVI (Landsat, Sentinel, Метеор-М).

Алгоритм классификации и оценка точности

Для решения задачи многоклассовой классификации сельскохозяйственных культур применялся алгоритм случайного леса (Random Forest), реализованный в библиотеке

scikit-learn языка Python. Каждый датасет (Sentinel, Landsat и объединённый S+L+M) разделялся на обучающую и тестовую выборки в пропорции 50:50. Перед проведением классификации внутри датасетов проводилась фильтрация для удаления выбросов для каждого исследуемого класса на основе межквартильного размаха. Размер датасетов для Sentinel варьировался от 85 267 в 2023 г. до 265 620 рядов в 2024 г. (для Landsat – от 61 526 до 126 148 рядов, для Метеор-М – от 15 457 до 31 970 рядов, соответственно).

Оценка качества классификации производилась с использованием стандартных метрик: общая точность классификации (ОА, %), характеризующая долю правильно классифицированных пикселей, и F1-меры для каждого класса культур, представляющие собой гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой (recall).

Надёжность полученных оценок точности верифицировалась посредством стратифицированной групповой трехкратной кросс-валидации. Данный подход обеспечивал сохранение пропорций классов в каждой группе при одновременном предотвращении попадания пикселей одного поля в различные группы, что критически важно для корректной оценки модели.

Статистическую значимость различий точности классификации при использовании методов SP и DF, а также данных разных спутниковых систем оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа, апостериорное попарное сравнение проводили с помощью критерия Тьюки ($p < 0,05$).

Результаты классификации

Сравнительный анализ методов классификации на основе сплайн-аппроксимации и применения функции DF для временных рядов NDVI за период 2022–2024 гг. показал различную эффективность подходов в зависимости от типа спутника и классифицируе-

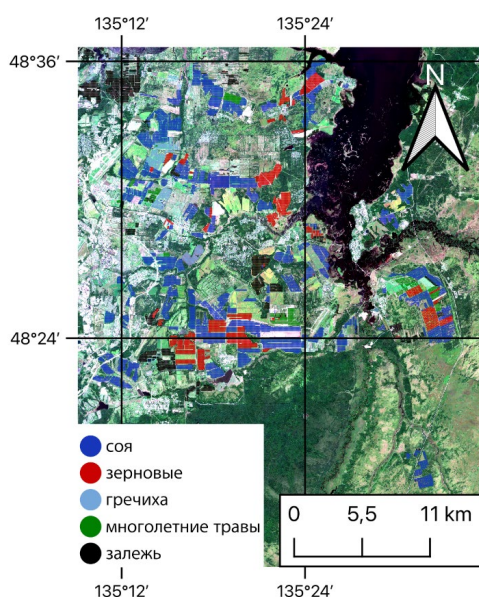
мого класса. Общая точность классификации в 2022 г. при использовании датасета S+L+M и метода SP составила 98,5 %, а для метода DF – 96,1 %. При этом для спутника Sentinel эти показатели были соответственно равными 95,0 и 93,7 %, для Landsat – 94,2 и 94,5 %. В 2023 г. точность классификации с помощью комбинации данных трех спутников также была выше (94,1–94,6 %), чем при использовании Sentinel (92,3–93,9 %) и Landsat (89,9–90,0 %). В 2024 г. ОА при применении датасета S+L+M находилась на уровне точности распознавания с использованием данных Sentinel. Значения F1-меры для разных классов также зависели от года наблюдения – при этом в большинстве случаев комбинация данных демонстрировала лучшие показатели в сравнении с отдельными спутниками. Например, значения F1-меры для класса сои для S+L+M были равными 0,98–0,99 в 2022–2024 гг., для зерновых культур 0,95–0,96 в 2022 г., 0,89–0,92 в 2023 г. и 0,97 в 2024 гг. Для оставшихся классов значения показателя сильно варьировали для разных лет наблюдения. В таблице представлены средние результаты кросс-валидации для распознавания сельскохозяйственных культур и залежи в 2022–2024 гг. для двух спутников и комбинированного подхода. В 2022 г. общая точность оказалась для трёх подходов схожей (наибольшая ОА получена для Sentinel – 97 %). Среднее значение F1-меры для комбинированного подхода и Sentinel выше, чем для Landsat (при использовании как SP, так и DF). В 2023 г. комбинация данных трёх спутников позволила достигнуть наибольшей точности (ОА – 94 %, $F1_{cp}$ – 0,87 для сплайн-аппроксимации, 96 % и 0,92 для DF), наихудшие показатели получены при использовании датасета Landsat (ОА – 89 %, $F1_{cp}$ – 0,79 для SP и 0,75 для DF). В 2024 г. самая высокая точность также была получена с использованием Sentinel-2 и S+L+M (общая точность 92–94 %, $F1_{cp}$ – 0,87–0,89).

Результаты трехкратной кросс-валидации алгоритма RF для пахотных земель Хабаровского края в 2022–2024 гг.

Спутник	2022 г.				2023 г.				2024 г.			
	ОА, %		$F1_{cp}$		ОА, %		$F1_{cp}$		ОА, %		$F1_{cp}$	
	SP	DF	SP	DF	SP	DF	SP	DF	SP	DF	SP	DF
Sentinel	96,8	96,2	0,95	0,92	93,0	92,6	0,83	0,84	93,7	93,7	0,89	0,88
Landsat	95,4	95,1	0,82	0,87	89,0	89,2	0,79	0,75	88,1	85,6	0,82	0,78
S+L+M	96,6	97,1	0,91	0,93	93,7	96,0	0,87	0,92	94,4	92,2	0,88	0,87

Методом двухфакторного дисперсионного анализа было установлено, что достоверных различий в точности классификации при применении SP и DF не выявлено как в разные годы наблюдения ($p = 0,79$), так и для различных спутниковых систем ($p = 0,81$). Вместе с тем значения общей точности значимо различались в зависимости от года наблюдения ($p = 0,02$) и спутниковой системы ($p = 0,03$). По результатам попарного сравнения с использованием критерия Тьюки было установлено, что точность классификации значимо выше в 2022 г. в сравнении с 2023 г. и 2024 г. Снижение точности в 2023–2024 гг. может быть связано с неблагоприятными метеорологическими условиями, расширением выборки (сортового разнообразия и применения различных сельскохозяйственных практик) и распределением снимков по каждому из сезонов. Общая точность классификации пахотных земель Хабаровского края на основе мультисенсорных данных (95,0 %) достоверно выше, чем с использованием данных Landsat (90,4 %), и незначительно выше ОА для Sentinel (94,3 %).

Таким образом, анализируя результаты классификации, следует отметить, что подход, основанный на использовании комбинированного датасета по данным трёх спутниковых систем, показал высокую эффективность. По результатам исследования сгенерированы карты-схемы пахотных земель (на рисунке представлена карта-схема для Хабаровского района в 2024 г.).



Карта-схема пахотных земель
Хабаровского района в 2024 г.

Созданные карты-схемы позволяют не только оценить соответствие информации о севооборотах, но также выявить неоднородности развития и уточнить границы участков как результат попиксельной классификации.

Заключение

Проведенное исследование позволило оценить точность автоматизированной классификации пахотных земель методом RF в зависимости от использованного метода аппроксимации временных рядов вегетационного индекса NDVI, года наблюдения, данных спутников Sentinel и Landsat, а также их комбинации с данными Метеор-М. Достоверных различий точности классификации при применении SP и DF не выявлено: при этом значимое влияние на точность оказывают год наблюдения и выбранный датасет. Необходимо отметить, что для отдельных классов качество распознавания могло существенно зависеть от способа аппроксимации, что обусловлено фенологическими особенностями каждого класса. Общая точность классификации пахотных земель на основе мультисенсорных данных (95,0 %) достоверно выше, чем с использованием данных Landsat (90,4 %), и незначительно выше точности для Sentinel (94,3 %). Значения F1-меры для разных классов пахотных земель также зависели от классифицируемого года, и в большинстве случаев применение данных трех спутников демонстрировало более высокие значения показателя в сравнении с отдельными спутниками. По результатам проведенной классификации в 2022–2024 гг. были построены карты-схемы пахотных земель Хабаровского края. Таким образом, использование мультисенсорного подхода с объединением данных трех систем ДЗЗ позволило увеличить точность классификации. Вместе с тем, можно предположить, что повышение точности распознавания отдельных культур достижимо за счёт выбора метода аппроксимации в зависимости от информации о фенологических особенностях сельскохозяйственных культур. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение возможностей параметризации методов аппроксима-

ции с учетом фенологических характеристик культур для достижения максимальной точности классификации.

Поддержка исследований. Исследования проведены с использованием ресурсов Цен-

тра коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» ХФИЦ ДВО РАН, финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2025-621

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Толпин В. А. Возможности и опыт использования информационной системы Вега-PRO для мониторинга сельскохозяйственных земель. *Вычислительные технологии*. 2022. Т. 27, № 3. С. 66–83. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.006.
2. Berra E. F., Fontana D. C., Yin F., Breunig F. M. Harmonized Landsat and Sentinel-2 Data with Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Article 2695.
3. Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D. et al. Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 269. Article 112831. DOI:10.1016/j.rse.2021.112831.
4. Yan S., Yao X., Zhu D., et al. Large-scale crop mapping from multi-source optical satellite imageries using machine learning with discrete grids. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. V. 103. Article 102485. DOI:10.1016/j.jag.2021.102485.
5. Abdali E., Valadan Zoej M. J., Taheri Dehkordi A., Ghaderpour E. A Parallel-Cascaded Ensemble of Machine Learning Models for Crop Type Classification in Google Earth Engine Using Multi-Temporal Sentinel-1/2 and Landsat-8/9 Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. 2024. V.16(1). Article 127. DOI:10.3390/rs16010127.
6. Xu C., Katchova A. L. Predicting Soybean Yield with NDVI Using a Flexible Fourier Transform Model. *Journal of Agricultural and Applied Economics*. 2019. V. 51(3). P. 402–416. DOI:10.1017/aae.2019.5.
7. Cai Z., Jönsson P., Jin H., Eklundh L. Performance of Smoothing Methods for Reconstructing NDVI Time-Series and Estimating Vegetation Phenology from MODIS Data. *Remote Sensing*. 2017. V. 9(12). Article 1271. DOI: 10.3390/rs9121271.
8. Павлова М. А., Сидорчук Д. С., Бочаров Д. А. Классификация сельскохозяйственных культур на основе анализа временных рядов вегетационного индекса с понижением их размерности. *Сенсорные системы*. 2023. Т. 37, № 2. С. 171–180. DOI:10.31857/S023500922302004X.
9. Воробьева Н. С., Чернов А. В. Аппроксимация временных рядов NDVI в задаче раннего распознавания видов сельскохозяйственных культур по космическим снимкам. *Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017)*. Самара: Новая техника, 2017. С. 390–399.
10. Scharlemann J. P.W, Benz D., Hay S. I. et al. Global Data for Ecology and Epidemiology: A Novel Algorithm for Temporal Fourier Processing MODIS Data. *PLoS ONE*. 2008. V. 3(1). Article 1408. DOI: 10.1371/journal.pone.0001408.
11. Pipia L., Belda S., Franch B., Verrelst J. Trends in Satellite Sensors and Image Time Series Processing Methods for Crop Phenology Monitoring. *Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme I: Sensors*. Springer Optimization and Its Applications. V. 182. Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-84144-7_8.
12. Zeng L., Wardlow B. D., Xiang X. et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 237. Article 111511.
13. Li N., Zhan P., Pan Y. et al. Comparison of Remote Sensing Time-Series Smoothing Methods for Grassland Spring Phenology Extraction on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Remote Sensing*. 2020. V.12(20). Article 3383. DOI: 10.3390/rs12203383.
14. Atzberger C., Eilers P. H. C. A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America. *International Journal of Digital Earth*. 2011. V.4(5). P. 365–386. DOI: 10.1080/17538947.2010.505664.
15. Илларионова Л. В., Степанов А. С., Дубровин К. Н. и др. Опыт использования данных прибора КМСС КА «Метеор-М» № 2 для задач мониторинга сельскохозяйственных угодий юга Хабаровского края. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22, № 1. С. 81–92. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-81-92.

16. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
17. Hang H., Yao X., Li Q., Artiles M. Cubic B-Spline Curves with Shape Parameter and Their Applications. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article 3962617. DOI:10.1155/2017/3962617.
18. Степанов А. С., Фомина Е. А., Илларионова Л. В. и др. Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края. Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22, № 6. С. 1473–1498. DOI: 10.15622/ia.22.6.8.

REFERENCES

1. Denisov P.V., Troshko K.A., Loupian E.A., Tolpin V.A. (2022) Potential and experience of Vega-PRO information system use for monitoring of agricultural lands. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*. 27(3). 66–83 [in Russian].
2. Berra E.F., Fontana D.C., Yin F., Breunig F.M. (2024) Harmonized Landsat and Sentinel-2 Data with Google Earth Engine. *Remote Sensing*. Vol. 16. Article 2695.
3. Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D. et al. (2022) Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 269. Article 112831. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112831.
4. Yan S., Yao X., Zhu D., et al. (2021) Large-scale crop mapping from multi-source optical satellite imageries using machine learning with discrete grids. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 103. Article 102485. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102485
5. Abdali E., Valadan Zoej M. J., Taheri Dehkordi A., Ghaderpour E. A (2024) Parallel-Cascaded Ensemble of Machine Learning Models for Crop Type Classification in Google Earth Engine Using Multi-Temporal Sentinel-1/2 and Landsat-8/9 Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. Vol.16(1). Article 127. DOI: 10.3390/rs16010127.
6. Xu C., Katchova A.L. (2019) Predicting Soybean Yield with NDVI Using a Flexible Fourier Transform Model. *Journal of Agricultural and Applied Economics*. Vol. 51(3). pp. 402-416. DOI:10.1017/aae.2019.5.
7. Cai Z., Jönsson P., Jin H., Eklundh L. (2017) Performance of Smoothing Methods for Reconstructing NDVI Time-Series and Estimating Vegetation Phenology from MODIS Data. *Remote Sensing*. Vol. 9(12). Article 1271. DOI: 10.3390/rs9121271.
8. Pavlova M.A., Sidorchuk D.S., Bocharov D.A. (2023) Classification of crops by NDVI time series of reduced dimensionality. *Sensornye sistemy [Sensory Systems]*. 37(2). 171-180 DOI: 10.31857/S023500922302004X. [in Russian].
9. Vorobiova N., Chernov A. (2017) Curve fitting of MODIS NDVI time series in the task of early crops identification by satellite images. *Sbornik trudov III mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly "Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii" (ITNT-2017)*. Samara: Novaya tekhnika [3rd International Conference "Information Technology and Nanotechnology"]. (pp. 184-195) Samara: Elsevier Ltd. [in Russian].
10. Scharlemann J.P.W, Benz D., Hay S.I. et al. (2008) Global Data for Ecology and Epidemiology: A Novel Algorithm for Temporal Fourier Processing MODIS Data. *PLoS ONE*. Vol. 3(1). Article 1408. DOI: 10.1371/journal.pone.0001408.
11. Pipia L., Belda S., Franch B., Verrelst J. (2022) Trends in Satellite Sensors and Image Time Series Processing Methods for Crop Phenology Monitoring, Information and Communication. *Technologies for Agriculture—Theme I: Sensors. Springer Optimization and Its Applications*. Vol. 182. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-84144-7_8.
12. Zeng L., Wardlow B.D., Xiang X. et al. (2020) A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 237. Article 111511.
13. Li N., Zhan P., Pan Y. et al. (2020) Comparison of Remote Sensing Time-Series Smoothing Methods for Grassland Spring Phenology Extraction on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Remote Sensing*. Vol.12(20). Article 3383. DOI: 10.3390/rs12203383.

14. Atzberger C., Eilers P.H.C. (2011) A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America. *International Journal of Digital Earth*. Vol. 4(5). pp. 365–386. DOI: 10.1080/17538947.2010.505664.
15. Illarionova L.V., Stepanov A.S., Dubrovin K.N. et al. (2025) Experience of using data from the Meteor-M No. 2 KMSS sensor for cropland monitoring in the south of Khabarovsk Krai. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*. 22(1). 81-92 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-81-92. [in Russian].
16. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev A.V. et al. (2019) Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]* 16(3). 151-170 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170. [in Russian].
17. Hang H., Yao X., Li Q., Artiles M. (2017) Cubic B-Spline Curves with Shape Parameter and Their Applications. *Mathematical Problems in Engineering*. Article 3962617. DOI: 10.1155/2017/3962617.
18. Stepanov A.S., Fomina E.A., Illarionova L.V., et al. (2023) Vegetation indices (NDVI and EVI) time series approximation for monitoring crops of Khabarovsk Territory. *Informatika i avtomatizaciya [Informatics and Automation]*. 22(6). 1473-1498. DOI: 10.15622/ia.22.6.8. [in Russian].

Об авторах

Любовь Викторовна Илларионова — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория численных методов математической физики.

Алексей Сергеевич Степанов — доктор фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория селекции зерновых и колосовых культур.

Константин Николаевич Дубровин — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория численных методов математической физики.

Елизавета Андреевна Фомина — инженер, лаборатория численных методов математической физики.

Author details

Lyubov V. Illarionova – PhD., Senior Researcher, Laboratory of Numerical Methods in Mathematical Physics.

Aleksey S. Stepanov – DSc., Leading Researcher, Laboratory of Grain and Cereal Crops Breeding.

Konstantin N. Dubrovin – PhD, Researcher, Laboratory of Numerical Methods of Mathematical Physics.

Elizaveta A. Fomina – Engineer, Laboratory of Numerical Methods of Mathematical Physics.

Получено / Received 13.05.2026

Поступила после рецензирования / Revised 17.06.2026

Принята к публикации / Accepted 17.07.2026

Обзорно-аналитическая статья/Review article

УДК 528.8:631

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-56-65>

**Возможности применения цифровых двойников местности
для исследования растительного покрова в сельском хозяйстве**

Д. В. Филиппов¹✉

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный геоинформационный центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: Gislab@ngic.ru

Аннотация. Одним из основных методов оперативного мониторинга растительного покрова является дистанционное зондирование Земли, включающее в себя съемку с космических аппаратов и авиационных носителей, в том числе и с беспилотных летательных аппаратов. Растительный покров представляет собой сложную динамическую природную систему, подверженную влиянию множества факторов. Для повышения эффективности распознавания растительного покрова по материалам дистанционного зондирования Земли необходима разработка и внедрение новых технологий. Одной из таких технологий является создание и использование цифровых двойников. Внедрение цифровых двойников в мониторинг растительного покрова позволит сократить время обработки материалов, а также существенно повысить достоверность получаемых результатов. Цифровые двойники получили значительное распространение в таких сферах, как машиностроение, авиастроение, космическая отрасль и строительство. Тем не менее, в области изучения растительного покрова, в сельском хозяйстве и природопользовании данная технология на сегодняшний день не получила столь же широкого применения. Целью данной статьи является проведение анализа основных научно-технических литературных источников, посвященных разработке методических и технологических возможностей применения цифровых двойников для изучения растительного покрова природных ландшафтов. На основе анализа литературных источников по созданию цифровых двойников объектов местности предложено одно из направлений по изучению вопросов создания и применения цифровых двойников растительного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, искусственный интеллект, машинное обучение, цифровые двойники местности, растительный покров, сельское хозяйство

Для цитирования:

Филиппов Д. В. Возможности применения цифровых двойников местности для исследования растительного покрова в сельском хозяйстве. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 56–65. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-56-65>

Application of digital terrain twins for vegetation analysis in agriculture

D. V. Filippov¹✉

¹Geoinformation Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

e-mail: Gislab@ngic.ru

Abstract. Remote sensing from orbital and aerial platforms, including unmanned aerial systems (UAS), constitutes a primary methodology for operational vegetation monitoring. Vegetation cover

represents a complex dynamic system governed by numerous biotic and abiotic drivers. To enhance the robustness of vegetation classification from remote sensing imagery, the development and integration of advanced computational frameworks are imperative. Digital twin technology emerges as a prospective solution to address this challenge. The assimilation of digital twins into vegetation monitoring can substantially reduce data processing latency while significantly improving the reliability and reproducibility of analytical outputs. Despite their widespread adoption in industrial sectors such as aerospace engineering and construction, the application of digital twins in phytocoenology, agriculture, and nature management remains underexplored. The study presents a systematic review of scientific and technical literature concerning the methodological foundations and technological capabilities required for implementing digital twins in natural landscape analysis. Based on this critical appraisal, the authors delineate a strategic research direction for the conceptualization and deployment of high-fidelity digital twins for vegetation systems.

Keywords: Remote sensing, UAVs, artificial intelligence, machine learning, digital terrain twins, vegetation cover, agriculture

For citation:

Filippov D. V. (2026). Application of digital terrain twins for vegetation analysis in agriculture. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 56–65. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-56-65>

Введение

Анализ мировых тенденций показывает, что информационное обеспечение – ключевой фактор для принятия обоснованных решений на разных уровнях. Оперативное получение достоверной и точной информации позволяет достигать наилучших результатов в любой сфере деятельности. Дистанционная разведка является одним из перспективных направлений получения оперативной информации. Данный вид разведки по назначению условно можно разделить на два направления – военное и гражданское. Однако независимо от назначения разведки задача у нее одна – выявить и распознать искомый объект (цель) по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В данной работе рассмотрена возможность применения цифровых двойников для исследования состояния растительного покрова с помощью дистанционной разведки.

Концепция цифрового двойника была введена в начале 2000-х гг. в ответ на растущую потребность в точном проектировании и управлении жизненным циклом продукции. Профессор, доктор Майкл Гривс из Мичиганского университета считается основоположником концептуальных основ цифровых двойников (ЦД). В 2002 г. он изложил основные концепции ЦД в докладе об управлении жизненным циклом продукта [1].

Наибольшего прогресса в создании и использовании цифровых двойников добились в космической, самолетостроительной, машиностроительной областях, в здравоохранении, а также в области развития технологии «Умный город» [1–3]. Применение этих технологий позволит во много раз повысить оперативность получения требуемой информации для изучения физических объектов и процессов при минимальных затратах человеческих ресурсов.

Цель этой статьи – проведение анализа возможности и перспективности применения технологии цифровых двойников для исследования растительного покрова.

Постановка задачи

Работа выполнялась в рамках диссертационного исследования и основной задачей был обзор современного состояния использования технологии цифровых двойников для изучения растительного покрова, в том числе для сельскохозяйственных культур.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть определение ЦД, а также связанные с ним технологии и отрасли, в которых ЦД уже применяются; сравнить основные сходства и различия ЦД природных и антропогенных объектов; выявить проблемные вопросы, связанные с созданием ЦД растительного покрова; предложить направление создания ЦД растительного покрова.

Первоначальное описание цифрового двойника определялось как виртуальное представление физического объекта, содержащее информацию об указанном объекте, которая берет свое начало в области пространства управления жизненным циклом этого объекта [4, 5]. А. В. Медведев в своих трудах предположил, что ЦД можно рассматривать как совокупность процессов, включающих в себя мониторинг, анализ состояния, прогнозирование и планирование развития территории [6].

В ходе анализа научных трудов был рассмотрен вопрос применения ЦД при выполнении дистанционного мониторинга растительного покрова. Согласно ГОСТ 17.8.1.01-86, природный ландшафт – это ландшафт, состоящий из взаимодействующих природных компонентов и формирующийся или сформировавшийся под влиянием природных процессов. Согласно Федеральному закону от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», к компонентам природной среды относятся земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле [Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»; ГОСТ Р 70284-2022. Охрана окружающей среды. Ландшафты. Термины и определения. М. 2022., 12 с. (Национальный стандарт Российской Федерации)].

В ходе выполнения исследования учитывались следующие факторы, касающиеся растительного покрова:

- возможное быстрое изменение состояния растительного покрова с течением времени, связанное с периодом вегетации, влиянием патологий, изменением водного режима и т. д.;
- присутствие циклического суточного изменения состояния растительного покрова;
- воздействие внешних факторов, влияющих на природный ландшафт в процессе выполнения дистанционного зондирования.

Учитывая установленные факторы, необходимо определить, какие пространственные, спектральные и атрибутивные данные

должны быть включены в состав ЦД растительного покрова и предложить способ получения этих данных. Исходя из состава данных для ЦД, был предложен подход к созданию ЦД растительного покрова. Полученные таким образом ЦД могут применяться в любой сфере деятельности, где необходим мониторинг растительного покрова, в том числе с использованием машинного обучения и ИИ.

Исследование применения цифровых двойников растительного покрова

Создание высокоточных качественных цифровых двойников связано с использованием больших массивов данных [7, 8]. Из истории разработки концепции цифрового двойника следует то, что он обладает четырьмя характеристиками: виртуально реалистичным отображением, синхронизацией в реальном времени, взаимной эволюцией и оптимизацией по замкнутому циклу. ЦД растительного покрова представляет собой сложную динамическую информационную систему, связывающую цифровой и физический образ объекта в течение всего его жизненного цикла [1, 9]. Jun-Feng Yao определил цифровой двойник как динамическое сюрреалистическое отображение системы физического объекта в реальном времени. ЦД облегчает объединение всех доступных данных, обеспечивая взаимосвязанное логическое пространство с согласованной информацией от космических аппаратов [10, 11]. Физическая сущность объекта является основой системы построения и источником данных для ЦД. Виртуальная сущность – это цифровое отображение физической сущности, составленное из геометрических и физических моделей, моделей движения и состояния объекта.

Для обработки большого количества исходных данных широко применяется искусственный интеллект (ИИ). Применение ИИ, основанного на машинном обучении, рассматривается как перспективная технология в области работы с ЦД.

Модель ЦД может быть использована для ускорения этапа машинного обучения путем генерации соответствующего набора обучающих данных и автоматической маркировки его с помощью цепочки инструментов моделирования, тем самым сокращая участие человека в процессе обучения.

Одним из подходов машинного обучения является машинное обучение, основанное на коллективном обучении без обмена фактическими данными [1, 12]. Эти наборы данных могут быть расширены и подвергнуты перекрестной проверке с использованием обширных реальных данных, которые не требуют значительного использования [13]. Существует множество типов глубокого обучения, например рекуррентные нейронные сети, сверточные нейронные сети и т. д. Глубокое обучение выполняется непосредственно на основе данных с несколькими уровнями обработки. Количество таких уровней, как правило, не более трех. Такой вид глубокого обучения называется машинным обучением на основе физики [12]. Тем не менее, методу машинного обучения требуется огромное количество высококачественных обучающих наборов данных. В случае контролируемого машинного обучения, для маркировки этих наборов данных часто требуется ручной ввод. Этот метод является дорогостоящим, подвержен ошибкам и занимает большое количество времени, особенно для природных объектов, имеющих сложную структуру и высокую динамичность своего состояния.

К таким условиям можно отнести возможное изменение климатических условий при выполнении ДЗЗ. Для предоставления полезной климатической информации необходимо соблюдение двух условий: повышение качества предоставляемой информации; высокая степень интерактивности. Также необходимо в состав информационной системы ЦД включать людей и процессы их деятельности [14].

Для создания качественного ЦД растительного покрова необходимо использовать данные, получаемые посредством обработки материалов ДЗ, в том числе включающие в себя математическое моделирование, с полемым подтверждением полученных результатов. На сегодняшний день собрано огромное количество материалов ДЗЗ. Но следует отметить, что далеко не все эти данные можно использовать для формирования пространства ЦД. Для ЦД можно применять обработанные материалы ДЗЗ, результаты которых подтверждаются полевыми исследованиями. Такие данные возможно получить только при выполнении подспутниковых наблюдений или в специальных лабораториях [15]. Подспутниковые наблюдения представляют собой ком-

плекс мероприятий, включающий измерения характеристик тест-объектов и тестовых участков, а также, опционально, параметров состояния атмосферы в целях оценки качества данных дистанционного зондирования Земли из космоса и продуктов их обработки.

При создании ЦД растительного покрова, находящегося в природных условиях, возникает ряд специфических моментов. Помимо морфометрического описания объекта, необходимо учитывать климатические параметры, физико-химический состав грунта, степень увлажненности грунта, освещенность в поле объекта и т. д. Параметры модели ЦД растений, входящих в состав растительного покрова, находятся в постоянной динамике. В работе Пеладаринос и др. [16] указывается на недостаточно активное применение ЦД в исследованиях в области сельского хозяйства. Наиболее часто интеллектуальные алгоритмы обработки материалов ДЗЗ используются для мониторинга растительного покрова на землях с искусственным орошением. Основными методами в этой области являются методы глубокого машинного обучения.

Перспективные разработки в области использования ЦД для изучения растительного покрова в аграрном секторе пока остаются неактивно востребованными из-за их узкой направленности и сложности представления в реальном времени [17]. Для создания ЦД растительного покрова, с возможностью дальнейшего его применения в области дистанционной разведки, ЦД необходимо рассматривать как совокупность составляющих элементов.

Т. В. Сукмановой и Н. С. Беловым [18] рассмотрено применение ЦД в управлении природопользованием на примере побережья Калининградской области. Уровень наполнения информационной модели включает в себя площадные объекты с определенными в пространстве границами. Также модель включает в себя рассчитанный индекс уязвимости береговой зоны, информацию об историческом развитии участка, современном состоянии инфраструктур, рельефе, природных и антропогенных источниках воздействия.

Однако для того, чтобы быть полноценным ЦД такой сложной природно-антропогенной системы, модель должна быть динамичной во времени [19]. Для этого необходимо цифровой двойник дополнять результатами сезонных исследований с указанием даты и времени их про-

ведения. Также в данной модели отсутствует информация о климатических условиях на момент выполнения космической и (или) аэрофото-съемки. Во многих научно-исследовательских работах ЦД рассматриваются как некая виртуальная информационная модель, применяемая для моделирования и прогнозирования различных процессов и ситуаций [18]. ЦД с точки зрения дистанционной разведки – это не только информационная модель самого объекта, но и еще множественные параметры окружающей среды. Растительный покров на материалах дистанционного зондирования в разное время года, суток, при различных климатических условиях может отображаться по-разному.

Растительный покров имеет сложную взаимосвязь своих физических свойств с внешними факторами [20]. Современные средства радиолокационной или сканерной съемки могут получать трехмерные образы растительного покрова и по этим данным можно определять таксационные показатели насаждений [21]. Но для интерпретации растительного покрова по составу куда более эффективным является использование их мульти- и гиперспектральных образов.

На формирование спектрального образа растительного покрова при выполнении ДЗЗ оказывают сильное воздействие климатические условия. Как было отмечено ранее, для создания ЦД растительного покрова к его информационной модели необходимо добавлять природно-климатические условия [9]. В

работе Kirstine I. Dale [22] рассмотрена проблема влияния климатических условий на объект при создании его цифрового двойника [23]. В своей работе авторы обосновывают, что существуют три категории ЦД: ЦД «Человек в курсе событий», полуавтоматический ЦД и полностью автоматический ЦД. Растительный покров является наиболее сложным объектом для создания ЦД. На параметры его ЦД влияет множество факторов, делающих его сложной многоструктурной системой. Д. Б. Эшпулатов упоминает возможность применения мультиагентного подхода при разработке цифровых двойников сельскохозяйственных культур, с использованием базы знаний и многоагентного моделирования [20]. Многоагентное моделирование сложных систем, к которым относится растительный покров, является задачей, решение которой требует применения знаний в различных областях науки и техники [24]. Материалы ДЗ, как один из основных источников информации для создания ЦД растительного покрова, как правило, представлены в виде мульти- и гиперспектральных цифровых изображений. На формирование яркостей объектов цифрового изображения оказывают влияние ряд факторов, связанных как с климатическими условиями, так и с состоянием растительного покрова. В таблице приведены основные факторы, которые должны быть учтены при создании ЦД растительного покрова.

Факторы, влияющие на спектральный образ растений при мульти- и гиперспектральной аэрокосмической съемке

№	Фактор	Оказываемое влияние	
		первичное	вторичное
1	Время года	Изменение вегетационного состояния растительного покрова	Изменение: температурного режима окружающей среды, условий освещенности покрова, возможное наличие снежного покрова
2	Время суток	Никтинастия у некоторых видов растений	Изменение температуры окружающей среды, условий освещенности покрова
3	Облачность	–	Изменение условий освещенности покрова
4	Водный режим	Нормальный, засуха или переувлажнение, приводящие к негативным процессам	Изменение физических свойств подстилающего почвенного покрова
5	Минералы	Норма, недостаток или избыток минералов в почве, приводящий к негативным процессам в растениях	Изменение физико-химических свойств подстилающего почвенного покрова
6	Патологии	Вредители и болезни, вызывающие угнетение и гибель растений	–

Так, например, наличие плотной облачности во время проведения аэрокосмической съемки травяного покрова сильно снижает уровень освещенности в плоскости исследуемого объекта и тем самым вносит изменение в получаемые цифровые изображения. При этом вегетационная стадия развития и физико-биологическое состояние травяного покрова остаются неизменными. Исключением является никтинастия у некоторых видов растений.

Учитывая проведенный анализ научных работ, можно сказать, что ЦД растительного покрова – это комплексная информационная модель, состоящая из совокупности ЦД, полученных в различное время года и суток, при различных климатических условиях и включающая в себя атрибутивную информацию.

Для создания ЦД природного растительного покрова часто используются релевантные модели. Однако они обладают рядом систематических искажений и каскадных ошибок. Снизить их влияние на качество модели можно путем увеличения пространственного разрешения обрабатываемых данных, однако такой подход может повлечь за собой сильное увеличение вычислительных мощностей [20]. Использование геопространственных технологий при создании ЦД растительного покрова дает ряд существенных преимуществ, таких как точность трехмерных моделей и их пространственного позиционирования, наличие развернутой структуры атрибутивных данных. Однако реализация данного подхода пока связана с необходимостью использования зарубежных технологических и программных средств [25].

Результаты

Как показал проведенный анализ информационных источников, цифровой двойник растительного покрова – это сложная информационная система, создание которой основано на методах трехмерного моделирования и геопространственных технологий. Информационное наполнение ЦД может изменяться в зависимости от того, для решения каких практических задач в области исследования растительного покрова он будет использоваться. Одной из важных составляющих ЦД растительного покрова являются разновременные геопространственные данные, полученные посредством выполнения ДЗЗ.

Принципы дистанционного зондирования Земли основаны на регистрации отраженной от поверхности солнечной энергии или сигнала от

специальных аппаратов. Физические основы формирования отраженного излучения от ландшафтов в видимом и инфракрасном диапазонах спектра показывают, насколько важна для цифрового двойника информация о дате и времени суток, когда были получены материалы ДЗ и атрибутивные данные. Суточное изменение альбедо в условиях сложного рельефа может составлять от десятков до 100 Вт/м² [26]. Данные дистанционного зондирования могут предоставлять для цифрового двойника трехмерные радиолокационные данные, мульти- и гиперспектральные изображения ландшафта. Результатом обработки мульти- и гиперспектральных космических снимков являются индексные изображения.

Обсуждение результатов

Перспективным видом ДЗЗ, материалы которого могут быть использованы для создания ЦД растительного покрова, может быть мульти- и гиперспектральная съемка местности. Вместе с тем, результаты мульти- и гиперспектральной съемки имеют достаточно сильную зависимость от погодных условий и времени выполнения съемки. На рис. 1 представлено влияние условий съемки (освещенности) на спектральный образ ландшафта. Съемка выполнялась гиперспектральной аппаратурой с КА Ресурс-П в разное время суток [15]. Интервал между датами съемок не превышает 7 дней, поэтому можно предположить, что природный ландшафт находился приблизительно в одном и том же физиологическом состоянии.

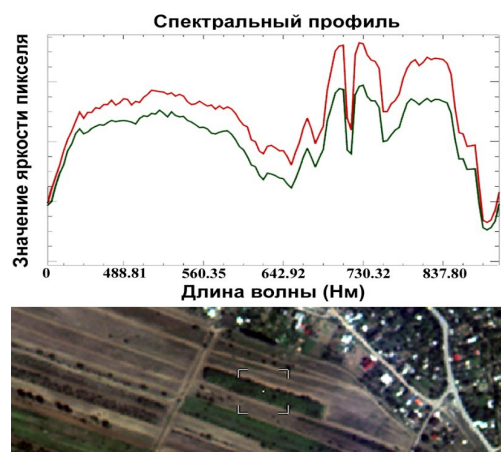


Рис. 1. Спектральный образ ландшафта, полученный по гиперспектральным снимкам Ресурс-П ГСА (зеленый график – 16.06.2018, облачность 0 %, красный график – 06.06.2018, облачность 56 %), точкой на цветном снимке указан объект, для которого построен профиль.

Кроме условий съемки на спектральный образ влияет и состояние растительного покрова. На графиках (рис. 2) видно, что у угнетенной растительности отсутствует поглощение в зонах синего и красного участков спектра, что указывает на низкое содержание в растениях хлорофилла (рис. 2).

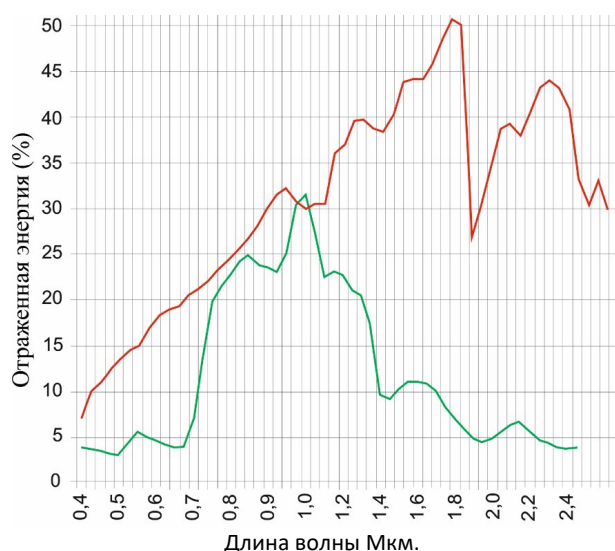


Рис. 2. Спектральный отклик зеленый график – зеленая луговая растительность, красный график – угнетенная травяная растительность

Также у угнетенной растительности отсутствует водное поглощение энергии в средних зонах инфракрасного излучения. Рассмотрев всего лишь два параметра, можно сделать вывод, что один и тот же природный объект, находясь в нормальном или угнетенном состоянии, может даже в

течение одного дня многократно менять свой спектральный состав под воздействием изменения окружающей среды. Поэтому ЦД должен включать в себя в обязательном порядке всевозможные варианты спектрального образа природного ландшафта. Получить достоверный спектральный образ природного объекта, а также смоделировать его изменение в зависимости от разных условий можно исключительно при постоянном его полевом наблюдении или в специализированном лабораторном комплексе.

Заключение

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день ЦД пока не получили широкого применения в отечественной практике исследования растительного покрова. Однако внедрение технологий, основанных на применении ЦД, в изучении растительного покрова, особенно в аграрном секторе, является перспективным направлением. Применение цифровых двойников для мониторинга растительного покрова в аграрном секторе позволит повысить урожайность сельскохозяйственных культур. При этом необходимо учесть, что ЦД отдельного растения, как и совокупность растений в виде растительного покрова, является сложной системой, подверженной влиянию различных факторов, в том числе и временных, которые определяют необходимость в разработке современных методологических и технологических направлений формирования ЦД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эшпулатов Достонбек Боходир угли Цифровые двойники в сельском хозяйстве: анализ основных тенденций. Цифровая экономика. 2023. № 2. С. 41–54.
2. Дорохов А. С., Павкин Д. Ю., Юрочка С. С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения. Техника и технологии АПК, Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 14–25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
3. Загурский А. В. Анализ рынка цифровых двойников и перспективы его развития. Актуальные исследования. 2024. № 11 (193). Ч. II. С. 21–24.
4. Zhihan Lv, Shuxuan Xie Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. Digital Twin. 2021. V.1. № 12. P. 1–20.
5. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом Дистанционного зондирования Земли. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 4. С. 58–67.

6. Медведев А. В. Цифровые двойники территорий для поддержки принятия решений в сфере регионального социально-экономического развития. Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6-1. С. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.38072>.
7. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Применение цифровых двойников при исследовании исторических ландшафтов береговой зоны. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2024. Т. 1. С. 425–441. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-425-441.
8. Сукманова Т. В. Применение цифровых двойников в природопользовании. Хим-БиоSeasons 2023 : сборник тезисов докладов Всероссийского форума молодых исследователей, Калининград, 20–22 апреля 2023 года. Кемерово : Кемеровский государственный университет. 2023. С. 97.
9. Могадам П., Лоу Т., Эдвардс Э. Дж. Цифровой двойник для будущих систем садоводства. TROPAG 2019.Международная конференция по тропическому сельскому хозяйству : сборник материалов (Брисбен, Австралия, 11–13 ноября 2019 г.). Брисбен : 2019. Vol.36, №1(92). DOI <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036092>.
10. Asaf Tzachor, Soheil Sabri, Catherine E. Richards, Abbas Rajabifard and Michele Acuto Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals. Nature Sustainability. 2022. Vol. 5. P. 822–829.
11. Wenqiang Yang, Yu Zheng, (Member, Ieee), And Shaoyang Li Application Status and Prospect of Digital Twin for On-Orbit Spacecraft. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 106489-106500.
12. Omer San, Suraj Pawar & Adil Rasheed Decentralized digital twins of complex dynamical systems. Scientific Reports. 2023. V.13, №20087. P. 1–15.
13. Hui Liu, He Yan, Jialin Hao, Wenshuo Xu, Zhou Min and Daiyin Zhu Application of Digital Twin Technology in Synthetic Aperture Radar Ground Moving Target Intelligent Detection System. Remote Sens. 2024. Vol. 16, № 2863. P. 1–22.
14. Hazeleger W., Aerts J. P. M., Bauer P., Bierkens M. F. P., Camps-Valls G., Dekker M. M., Doblas-Reyes F. J., Eyring V., Finkenauer C., Grundner A., Hachinger S., Hall D. M., Hartmann T., Iglesias-Suarez F., Janssens M., Jones E. R., Kölling T., Lees M., Lhermitte S., van Nieuwpoort R. V., Pahker A. K., Pellicer-Valero O. J., Pijpers F. P., Siibak A., Spitzer J., Stevens B., Vasconcelos V. V. & Vossepoe F. C. Digital twins of the Earth with and for humans. Communications Earth & Environment. 2024. Vol. 5, № 463. P. 1–11.
15. Филиппов Д. В. Исследование влияния освещенности на расчет вегетационных индексов на примере NDVI. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 5. С. 151–162. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-151-162.
16. Peladarinos Nikolaos, Piromalis Dimitrios, Cheimaras Vasileios, Tserepas Efthymios, Munteanu Radu Adrian and Papageorgas Panagiotis. Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. Sensors 2023. Vol. 23, № 7128. P. 2–39. DOI: 10.3390/s23167128.
17. Goldenits Georg, Mallinger Kevin, Raubitzek Sebastian, Neubauer Thomas. Current applications and potential future directions of reinforcement learning-based Digital Twins in agriculture. Smart Agricultural Technology. 2024. № 8. P. 1–14. DOI: 10.48550/arXiv.2406.08854.
18. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Применение цифровых двойников в управлении Природопользованием на примере побережья калининградской Области. Сборник трудов конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)». 2024. Т. 1, № 4. С. 498–505.
19. Скобелев П. О, Галузин В. А., Галицкая А. В., Галузин А. А. Прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений. Онтология проектирования. 2025. Т. 15. № 2. С. 211–227. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227.
20. Эшпулатов Д. Б. Возможности применения цифровых двойников в сельском хозяйстве. Экономика и предпринимательство. 2023. № 3. С. 523–529.
21. Юнсон Э. В., Мельничук Д. Ю. Цифровой двойник лесного массива. Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 6 (144). С. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.47>.
22. Kirstine I. Dale, Edward C. D. Pope, Aaron R. Hopkinson, Theo Mccaie, And Jason A. Lowe Environment-Aware Digital Twins: Incorporating Weather and Climate Information to Support Risk-Based Decision-Making. Artificial Intelligence for the Earth Systems. 2023. Vol. 2, № 4. P. 1–6. DOI: 10.1175/aies-d-23-0023.1.

23. Комсомольская правда: сайт. Санкт-Петербург. Цифровые двойники растений: самарские ученые разработали платформу для точного земледелия URL: <https://www.spb.kp.ru/daily/-27489/4747397/?ysclid=m7t5d2cj9z216598494> (дата обращения 21.10.2025).
24. Верхова Г. В., Акимов С. В., Присяжнюк С. П. Распределенное многоагентное моделирование сложных систем. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2021. Т. 1. С. 82–85.
25. Раскрытие возможностей геопространственных технологий для создания цифровых двойников/ The Spatial Times. 2003. URL: <https://africansurveyors.net/unlocking-the-power-of-geospatial-technology-to-create-digital-twins/#3-what-is-a-digital-twin>.
26. Ana P. Barros Digital Twin Earth: the next-generation Earth Information System // *Frontiers in Science Editorial*. 2024, Vol. 2. P. 1–4. DOI 10.3389/fsci.2024.1383659.

REFERENCES

1. Eshpulatov D.B. (2023). Digital Twins in Agriculture: An Analysis of Key Trends. *Tsifrovaya ekonomika. [Digital economy]*, 2, 41-54 [in Russian]
2. Dorokhov A.S., Pavkin D. Yu., Yurochka S. S. (2023). Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Tekhnika i tekhnologii APK, Agroinzheneriya. [Machinery and Technologies in the Agro-Industrial Complex, Agricultural Engineering]* 25(4), 14-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25 [in Russian].
3. Zagurskiy A.V. (2024). Analysis of the digital twin market and prospects for its development. *Aktual'nyye issledovaniya [Current Research]*, 11 (193), 21-24 [in Russian]
4. Zhihan Lv, Shuxuan Xie. (2021). Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin*, 1(12), 1-20
5. Altyntsev M. A., Karpik P. A. (2020). Creating metric simulated model of a "digital twin" by the active earth remote sensing method. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(4), 58-67 [in Russian]
6. Medvedev A.V. (2020). Digital Twins of territories to support decision-making in the field of regional socio-economic development. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. [Modern High Technologies]*, 6-1, 61-66. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.38072> [in Russian]
7. Sukmanova T. V., Belov N. S. (2024). Application of digital twins in the study Of historical landscapes of the coastal zone. *InterCarto. InterGIS, [InterCarto. InterGIS]* 1, 425-441. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-425-441 [in Russian]
8. Sukmanova T. V. (2023). Application of digital twins in nature management. *Abstracts in the collection of reports of the All-Russian Forum of Young Researchers: XumBuoSeasons [Collection of abstracts of the All-Russian Forum of Young Researchers Kemerovo State University]* (p. 97) Kemerovo: Kemerovo State. University. [in Russian]
9. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. (2020). Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Article in the proceedings of the International Conference on Tropical Agriculture : TROPAG 2019 [Proceedings of the International Conference on Tropical Agriculture: TROPAG 2019]* 36(92) Brisbane DOI <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036092>
10. Tzachor A., Sabri S., Richards C.E., Rajabifard, Acuto M. (2022). Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals. *Nat ure Susta inability*. 5. 822–829
11. Yang W., Zheng Y., (Member, Ieee), And Li S. (2023). Application Status and Prospect of Digital Twin for On-Orbit Spacecraft. *IEEE Access*. 9. 106489-106500
12. San O., Pawar S., Rasheed A. (2023). Decentralized digital twins of complex dynamical systems. *Scientific Reports*. 13(20087). 1-15
13. Liu H., Yan H., Hao J., Xu W., Min Zhu, D. (2024). Application of Digital Twin Technology in Synthetic Aperture Radar Ground Moving Target Intelligent Detection System. *Remote Sens*. 16(2863). 1-22
14. Hazeleger W, Aerts J. P. M., Bauer P., Bierkens M. F. P., Camps-Valls G., Dekker M. M., Doblas-Reyes F. J., Eyring V., Finkenauer C., Grundner A., Hachinger S., Hall D.M., Hartmann T., Iglesias-Suarez F., Janssens M., Jones E.R., Kölling T., Lees M., Lhermitte S., van Nieuwpoort R. V., Pahker A.K., Pellicer-Valero O. J., Pijpers F. P., Siibak A., Spitzer J., Stevens B., Vasconcelos V. V., Vossepoef F. C. (2024). Digital twins of the Earth with and for humans. *Communications Earth & Environment*. 5(463). 1-11

15. Filippov D. V., Tarnopolskiy L. A., Boyarenkova A. D. (2023). Research of the influence of illumination on the calculation of vegetation indices using as example NDVI. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 28(5). 151-162. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-151-162. [in Russian]
16. Peladarinos N., Piromalis D., Cheimaras V., Tserepas E., Adrian Munteanu R., Papageorgas P. (2023). Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. *Sensors*. 23(7128). 2-39. - DOI: 10.3390/s23167128
17. Goldenits G., Mallinger K., Raubitzek S., Neubauer T. (2024). Current applications and potential future directions of reinforcement learning-based Digital Twins in agriculture. *Smart Agricultural Technology*. 8. 1-14. DOI: 10.48550/arXiv.2406.08854
18. Sukmanova T.V., Belov N. S. (2024). The use of digital twins in environmental management: a case study of the Kaliningrad region's coastline. In the proceedings of the conference: "Marine Research and Education (MARESEDU-2023) [Conference materials: "Marine Research and Education (MARESEDU-2023)]". 1(4). (pp. 498-505). St. Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov. [in Russian]
19. Skobelev P. O., Galuzin V. A., Galitskaya A. V., & Galuzin A. A. (2025). Forecasting the development of agricultural crops in a digital twin of plant cultivation. *Ontologiya proyektirovaniya. [Ontology of Designing]*, 15(2), 211-227. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227 [in Russian]
20. Eshpulatov D. B. (2023). Possibilities of using digital twins in agriculture. *Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economics and Entrepreneurship]*. 3. 523-529. [in Russian]
21. Yunson E.V., Melnichuk D. Y. (2024). The digital double of the woodland. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. [International Research Journal]*. 6 (144). 1-5. DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.47>. [in Russian]
22. Kirstine I. D., Edward C. D. Pope, Aaron R. Hopkinson, Theo Mccaie, Jason A. Lowe (2023). Environment-Aware Digital Twins: Incorporating Weather and Climate Information to Support Risk-Based Decision-Making. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*. 2(4). 1-6. DOI 10.1175/aies-d-23-0023.1
23. Komsomolskaya Pravda: website. Saint-Petersburg. Digital twins of plants: Samara scientists have developed a platform for precision farming.(2023). Retrieved from <https://www.spb.kp.ru/daily/27489/4747397/?ysclid=m7t5d2cj9z216598494>
24. Verkhova G.V., Akimov S. V., Prisiazhniuk S. P. (2021). Distributed multi-agent modeling of complex systems. in the proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements. [Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2021)].1. (p.p. 82-85). Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov. [in Russian]
25. Unleashing the Power of Geospatial Technologies to create Digital Twins (2003). The Spatial Times. Retrieved from <https://africansurveyors.net/unlocking-the-power-of-geospatial-technology-to-create-digital-twins/#3-what-is-a-digital-twin>
26. Ana P. Barros (2019). Digital Twin Earth: the next-generation Earth Information System. *Frontiers in Science Editorial*. 2. 1-4. DOI 10.3389/fsci.2024.1383659

Об авторе

Дмитрий Викторович Филиппов – кандидат технических наук, директор.

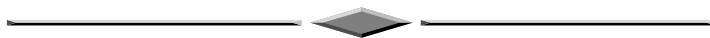
Author details

Dmitry V. Filippov – PhD, Director.

Получено / Received 17.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.05.2026

Принята к публикации / Accepted 21.07.2026



Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.94(571.5)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-66-74>

Картографирование наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР (на примере р. Баргузин, бассейн оз. Байкал)

А. Н. Бешенцев^{1✉}, Т. А. Борисова¹

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация,
e-mail: abesh@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты геоморфометрического анализа рельефа для определения и картографирования параметров наводнений в бассейне реки Баргузин. В программной среде Saga GIS создана цифровая модель рельефа (ЦМР). Автоматизированный анализ индексов рельефа и экспертное дешифрирование разновременных снимков Landsat позволили дифференцировать территорию бассейна на однородные гидрологические участки, характеризующиеся схожими физико-географическими параметрами развития наводнений. Картографирование зоны затопления выполнено в программной среде ArcGIS на основании топографической основы масштаба 1 : 100 000. В качестве гидрологической информации использованы результаты обработки фондовых материалов многолетних (1936–2015 гг.) наблюдений наводнений на р. Баргузин. Для получения абсолютных отметок границ зон затоплений сделана выборка максимальных уровней по многолетним рядам наблюдений, использованы расчетные уровни воды в створах, полученные с помощью кривых распределения ежегодных вероятностей превышения максимальных уровней воды дождевых паводков для гидрологических постов. Составлены карты средних уровней воды и площадей затопления территории. Для картографической оценки риска от наводнений использовался вероятностно-площадной подход. Составлены частные карты и интегральная карта рисков.

Ключевые слова: р. Баргузин, наводнение, цифровая модель рельефа, геоморфометрический анализ, опасность, риск

Для цитирования:

Бешенцев А. Н., Борисова Т. А. Картографирование наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР (на примере р. Баргузин, бассейн оз. Байкал). *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 66–74. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-66-74>

Flood mapping based on geomorphometric analysis of a digital elevation model: a case study of the Barguzin River basin, Lake Baikal

A. N. Beshentsev^{1✉}, T. A. Borisova¹

¹ Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation
e-mail: abesh@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a geomorphometric analysis conducted to identify and map flood characteristics within the Barguzin River basin. A digital elevation model was generated using the SAGA GIS environment. Automated analysis of topographic indices, combined with expert interpretation of multitemporal Landsat imagery, enabled the basin to be subdivided into homogeneous hydrological areas with comparable physiographic conditions governing flood development. Flood-inundation mapping was performed in ArcGIS using a 1:100,000-scale topographic map. The hydrological inputs comprised processed archival records from long-term observations of floods on the Barguzin River for the period 1936–2015. Elevation values for flood boundaries were derived from the maximum water levels recorded in the historical series. In addition, design water levels at gauging stations were incorporated; these were calculated using exceedance-probability curves for annual maximum rainfall-induced flood stages recorded at hydrological monitoring posts. Maps of mean water levels and flood-inundation extents were subsequently produced. Territorial exposure to flood risk was assessed using a probabilistic area-based approach. As a result, a set of thematic maps and an integrated flood-risk map for the Barguzin River basin were compiled.

Keywords: Barguzin River, flood, digital elevation model, geomorphometric analysis, danger, risk

For citation:

Beshentsev A. N., Borisova T. A. (2026) Flood mapping based on geomorphometric analysis of a digital elevation model: a case study of the Barguzin River basin, Lake Baikal. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 66–74. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-66-74>

Введение

Наводнения представляют собой наиболее повторяющуюся, слабо прогнозируемую и приводящую к значительным ущербам природную опасность для жизнедеятельности общества. Примером тому служат экстремальные наводнения в Иркутской области в 2019 г. [1–3], в нижнем течении р. Амур в 2019 г. [4, 5], на реках Урал и Иртыш в 2024 г. [6]. Во всех случаях объявляются ЧС различного уровня, происходит эвакуация людей, подсчитываются ущербы. Территория бассейна оз. Байкал представляет собой широкую арену для ряда опасных гидрологических процессов и явлений, изучение которых имеет значимый научно-практический интерес для целей эффективного территориального управления и минимизации рисков от их воздействий.

Одним из водных объектов, на которых регистрируются периодические наводнения с затоплением и подтоплением прибрежных территорий и расположенных на них хозяйственных объектов, является бассейн р. Баргузин (бассейн оз. Байкал). Для точной метрической оценки параметров наводнений и минимизации ущербов для хозяйственно освоенных территорий необходимо комплексное изучение гидрологических показателей рек бассейна, физико-географических характери-

стик территории, прежде всего рельефа, определение пространственно-временных закономерностей прохождения наводнений в бассейне и оценка риска от возможных затоплений территории.

Целью исследования является регистрация планово-высотных параметров наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР для геоинформационного картографирования и оценки возможных рисков при их прохождении в бассейне р. Баргузин.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является бассейн р. Баргузин. Верховье реки и ее притоки характеризуются как горные, в среднем-нижнем течении река приобретает характер горно-равнинной. На территории бассейна р. Баргузин располагаются два крупных административных сельских района Республики Бурятия (Баргузинский и Курумканский). Крупными населенными пунктами являются центры с. Курумкан и с. Баргузин, а также промышленный (бывший завод по переработке рыбы) пос. Усть-Баргузин, села Майск, Юбилейный (бывшие центры по лесозаготовке и переработке) (рис 1, а). Остальные поселения имеют преимущественно сельскохозяйственную направленность. Большинство сельскохозяй-

ственных объектов (овцеводческие товарные фермы (ОТФ), летники, сенокосные и пастбищные угодья) размещается на затопляемой пойме р. Баргузин – на самых продуктивных сельскохозяйственных землях районов.

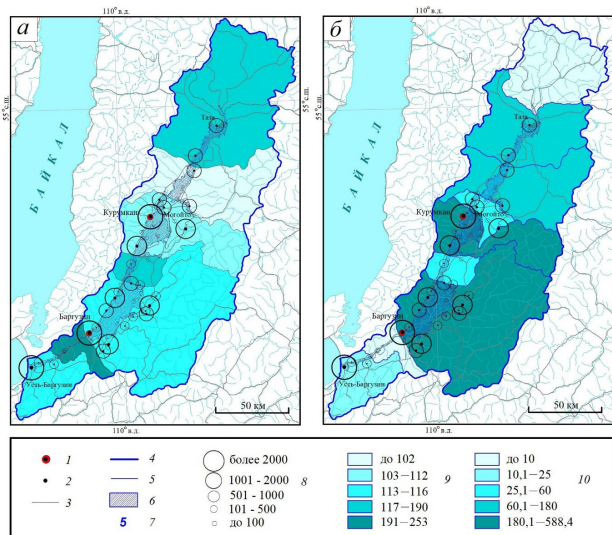


Рис. 1. Опасность наводнений в бассейне р. Баргузин:

а) величина наводнений; б) площадь наводнений; 1 – центры административных районов; 2 – прочие населенные пункты; 3 – автомобильные дороги; 4 – граница бассейна; 5 – границы участков; 6 – зона затопления; 7 – номер участка; 8 – численность населения в населенных пунктах, чел.; 9 – уровень воды над поймой, см; 10 – площадь наводнения, км²

Архивные исторические материалы свидетельствуют о периодических наводнениях на реке и сходе селевых потоков на горных притоках. Как показывает статистика с момента организации гидрологических постов, катастрофические наводнения зарегистрированы в 1933, 1936, 1938, 1949, 1971, 1973, 1988 гг. и значительные – в 1940, 1942, 1947, 1948, 1966, 1975, 1984, 1985, 1986, 2019, 2022 гг. Селевые паводки зафиксированы на правобережных (склоны Баргузинского хребта) притоках в 1961, 1970, 1975 гг.; на левобережных (склоны Икатского хребта) – в 1957, 1964, 1967, 1970, 1971, 1978 гг. Ущерб

были нанесены сельскохозяйственной отрасли, поскольку большинство ОТФ, летников, зимников, сенокосных и пастбищных угодий размещаются на затопляемой пойме.

В исследовании применены стандартные статистические методы обработки гидрологической информации, картографический метод, приемы экспертного и автоматизированного дешифрирования спутниковых материалов, геоморфометрический анализ, геоинформационная технология. Картографирование зон затопления выполнено в программной среде ArcGIS на основании дешифрирования разновременных спутниковых материалов Landsat [7] и топографической основы масштаба 1 : 100 000 КБ «Панорама» [8]. В качестве гидрологической информации для получения абсолютных отметок границ зон затоплений проведен анализ и сделана выборка максимальных уровней по многолетним рядам наблюдений, использованы расчетные уровни воды в створах, полученные с помощью кривых распределения ежегодных вероятностей превышения максимальных уровней воды дождевых паводков для уровневых гидрологических постов. Данные предоставлены Гидрометцентром РБ [9]. В целом для бассейна, отдельных его участков, а также небольших населенных пунктов, не располагающих гидрометрическими постами, определение максимальных уровней проведено методом интерполяции с учетом продольного профиля и падения реки.

Для визуализации рельефа местности и последующей оценки формирования и развития наводнений создана цифровая модель рельефа (ЦМР) (рис. 2, а). Для создания производных покрытий и расчета морфометрических индексов в ArcGIS использован алгоритм Zevenbergen-Thorne [10] эффективность и достоверность которого подтверждена другими исследованиями [11,12]. В данном проекте для создания ЦМР бассейна р. Баргузин использовались векторные слои горизонталей (высота сечения рельефа 20 м), отметок высот и урезов воды топографической основы масштаба 1 : 100 000 КБ «Панорама».

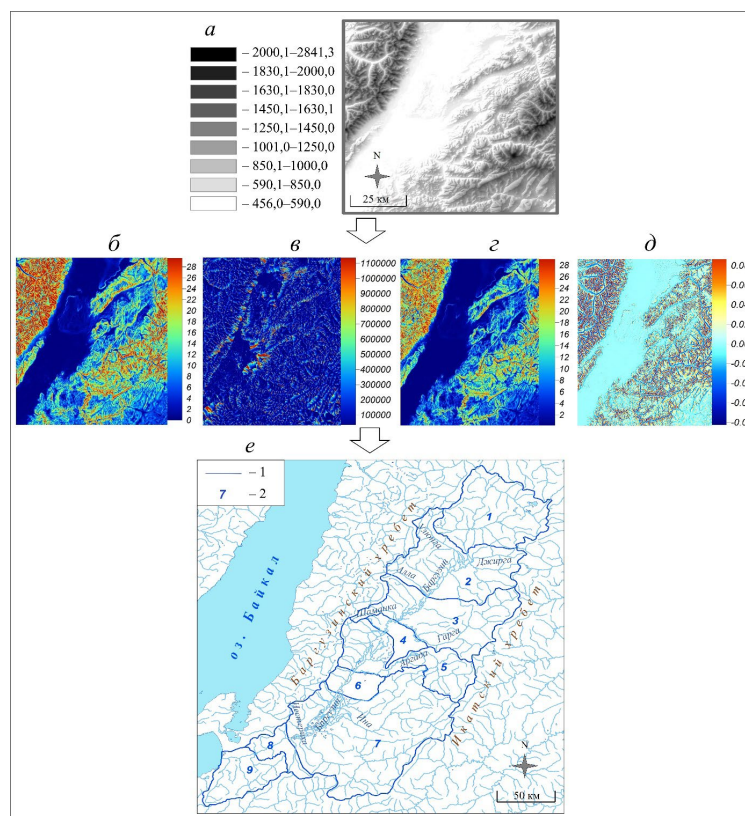


Рис. 2. Методика геоморфометрического анализа для геоинформационной диагностики наводнений:

а) цифровая модель рельефа (фрагмент); *б)* индекс уклона рельефа; *в)* индекс аккумуляции потока; *г)* индекс потенциала плоскостной эрозии; *д)* индекс баланса геомасс; *е)* гидрологические участки; 1 – границы гидрологических участков, 2 – номера гидрологических участков

Выделение и точную оценку планово-высотных параметров рельефа на земной поверхности обеспечил геоморфометрический анализ [13–15], который является эффективным методом при оценке влияния рельефа на функционирование геосистем. В данном исследовании использовались геометрические параметры рельефа – индексы программной среды Saga GIS [16], характеризующие особенности морфологии территории и определяющие скорость и интенсивность потоков вещества и энергии, а также динамику склоновых процессов. К этой группе относятся: высота рельефа; уклон рельефа; индекс баланса геомасс; индекс расчлененности рельефа; индекс аккумуляции потока; индекс потенциала плоскостной эрозии; индекс мощности эрозии (см. рис. 2, б–д).

В результате совмещения ЦМР и векторных слоев карты «Ландшафты Восточной Сибири» [17] выполнен экспертный ланд-

шафтно-гидрологический анализ, позволивший установить гидрологические особенности и морфологию котловины и провести укрупненное деление территории бассейна р. Баргузин на отдельные топологические единицы – гидрологические участки с характерными геоморфологическими параметрами и природными условиями, способствующими формированию и развитию наводнений (см. рис. 2, е). Созданное векторное покрытие гидрологических участков является основой для последующего картографирования опасности наводнений и их рисков для хозяйства и населения.

Для картографической оценки риска от наводнений использовался вероятностно-площадной подход [18, 19]. Показатель «удельный физический риск» используется при сравнительной оценке и характеризует удельные потери с единицы площади в пределах оцениваемой территории за единицу времени и рассчитывается по формуле:

$R(sf) = P(H) \times V(H)$, где $P(H)$ – частота возникновения опасности; $V(H)$ – уязвимость территории, определяемая по формуле: $V(H) = S(H) \div S(T)$, где $S(H)$ – площадь поражения опасностью; $S(T)$ – общая площадь оцениваемой территории. Этот показатель важен для расчетов вероятных ущербов от наводнений – экономический риск и сельскохозяйственный риск. Затем численные показатели рисков переведены в баллы по пятиступенчатой шкале – очень высокий, высокий, средний, низкий, очень низкий [20].

Результаты и обсуждение

Показатель «величина наводнений» индивидуален для каждой реки и определяется гидрологическими условиями и морфологией долины (см. рис. 1, а). Он рассчитан как разница максимального подъема уровня воды над критическим уровнем выхода воды на пойму [20]. Вероятная граница площади затопления рассчитывается на основе показателя величины наводнений по топографической основе и разновременным космическим снимкам (см. рис. 1, б).

Уровни воды в р. Баргузин по исследуемым гидрологическим постам составляют от 111 до 253 см. Максимальные значения характерны для периода летних паводков. Исключительные подъемы отмечаются на отдельных участках в местах сужения долины и неразвитой поймы. Превышение уровня воды выше критических отметок может достигать около 0,8–0,9 м, в среднем течении – 0,3–0,5 м и в устьевой части до 0,8 м вследствие подпора уровнем Байкала. Средние наводнения встречаются с вероятностью до 0,2–0,3 м, при которых затоплению подвергаются сельскохозяйственные угодья и отдельные объекты инфраструктуры, и экстремальные 0,04–0,1 м с масштабным затоплением хозяйственных объектов.

Формирование наводнений начинается в верховьях р. Баргузин. Превышение критического уровня здесь составляет 0,8–0,9 м. При выходе в котловину происходит распластывание воды по пойме и уровни резко падают. Значительное воздействие на развитие экстремальных паводков оказывают ее левобережные и правобережные притоки в котловинной части. При этом основные левобереж-

ные притоки (рр. Аргада, Гарга, Ина) вносят весьма существенный вклад в формирование наводнений. Так, максимальный срочный расход р. Аргада составляет 557 м³/с (1978 г.); р. Ина достигает 1390 м³/с (1970 г.) при среднемноголетнем 513 м³/с. Но тем не менее, правобережные притоки многочисленны (более 30 постоянных и временных горных водотоков восточного крутого склона Баргузинского хребта), они в сумме дают также большой объем водной массы. Следует отметить, что в многоводные годы прослеживается синхронность паводочных пиков на левобережных и правобережных притоках.

Горный рельеф, резкие уклоны предопределяют моментальный подъем воды по притокам, с быстрым сбросом воды в долину. Однако, вследствие регулирующей функции поймы, интенсивность подъема уровня во время паводков на р. Баргузин составляет в среднем 1,0–1,5 м/сутки, спада 0,7–1,0 м/сутки. Подъем воды по времени колеблется от 3–7 до 10 и более дней (1973 г. – 19 дней), спад – 10–17 дней. Продолжительность стояния высоких отметок в пределах от 8–10 дней до 22 и более, может достигать 32 суток (1971, 1973 гг.).

В верховьях в условиях резко расчлененного горного рельефа, больших уклонов, узких долин (восточный склон Баргузинского хребта и западный склон Икатского хребта) происходит быстрый сброс воды – показатели опасности высокие, но зоны затопления несут существенны. В котловинной части при резком расширении долины в условиях ее низкой равнинности с высокой степенью заболоченности и заозерности (естественная зарегулированность) происходит распластывание потока по пойме, уровни воды падают, но при этом резко увеличиваются размеры затоплений. Уровни воды в котловинной части реки повышаются на двух участках – в местах сужения поймы вследствие прижимов и дополнительного привноса водной массы рек Шаманка, Гарга и других притоков, а также р. Аргада. При выходе из котловины в условиях узкой долины, ограниченной отрогами Голондинского и Баргузинского хребтов, уровни высокие, зоны затопления незначительны. В устьевой части при выходе реки на небольшую прибрежную низменность, распо-

ложенную вокруг Баргузинского залива, паводочные пики несколько сглаживаются, но вследствие подпора (зарегулированности озера и подъема уровня) происходит нарушение естественного стока и при высоких уровнях воды в реке усиливаются процессы заболачивания и подтопления прибрежных территорий.

Установлено, что в результате максимальных наводнений площадь территорий, подверженная затоплению, достигает 1 457,2 км², что составляет 6,9 % территорий бассейна. Совмещение слоев гидрологических участков [21] и зоны затопления со слоем сельскохозяйственных угодий позволило установить, что всего в среднем затопляется 34,4 км² пашни, 407,4 км² сенокоса, 405,6 км² пастбища. Наибольшему затоплению подвержены земли котловинной части – участки 2, 3, 5, 7. Наибольшая площадь пашни подвержена затоплению на гидрологических участках 3, 5, 7. Затопление пастбищ происходит на участках 2, 5, 7, сенокоса – на участках 3, 5, 7. По причине отсутствия леса в котловинной части бассейна затоплению подвержены небольшие колки, больше всего лесной растительности затопляется на участке 2. Затоплению и подтоплению подвергаются более 30 населенных пунктов. Площади земель населенных пунктов составляют 8 км² (рис. 3, а, б).

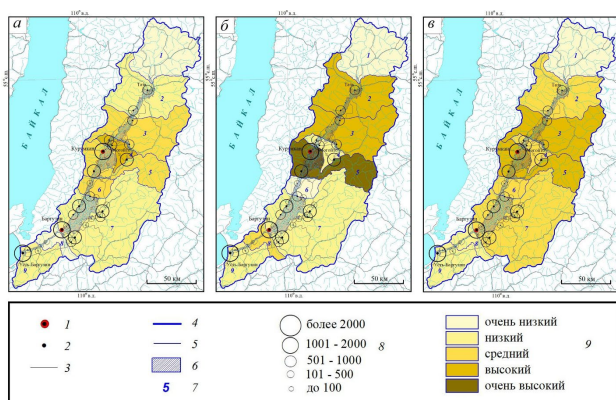


Рис. 3. Риски при прохождении наводнений на р. Баргузин:

а) индивидуальный риск; б) сельскохозяйственный риск; в) интегральный риск; 1 – центры административных районов; 2 – прочие населенные пункты; 3 – автомобильные дороги; 4 – граница бассейна; 5 – границы участков; 6 – зона затопления; 7 – номер участка; 8 – численность населения в населенных пунктах, чел.; 9 – удельный риск

Результаты расчетов за весь период исследования показывают, что в среднем при наводнениях в бассейне поражается около 219 км²/год. Высокие показатели отмечаются в котловинной части реки на участках 5 (67 км²/год) и 7 (64 км²/год), что составляет более половины всех затопляемых земель. Значительные потери несет сельскохозяйственная отрасль, поскольку это самые продуктивные сельскохозяйственные угодья на территории бассейна. Ежегодно временно выводится из оборота около 130 км² сельскохозяйственных земель (сенокосы, пастбища). Прямой ущерб для республики при наиболее масштабном наводнении (1 % обеспеченности) на р. Баргузин оценивается более 27 млрд руб. Экономический риск от наводнений оценивается в 3 221,61 млн руб. в год. Из них ущербы для поселений – около 173 млн руб. в год, что составляет около 6 % всех возможных потерь [22]. Большинство территорий поселений расположены на безопасных отметках. Затоплению и подтоплению подвергаются частично в основном села нижнего течения р. Баргузин.

Карта интегрального риска от наводнений создана по результатам обобщенного анализа показателей, частных карт рисков – пораженности территории в целом, сельскохозяйственных угодий и населения (см. рис. 3, в). Высоким уровнем риска обладают участки котловинной части р. Баргузин (участки 3, 5), как наиболее сельскохозяйственно-освоенные, хотя по рассмотренным показателям опасности относительно менее опасны. Участки 8, 9 характеризуются низким уровнем пораженности, но при этом имеют высокие показатели опасности.

Заключение

Особенности паводковых наводнений в бассейне р. Баргузин заключаются в следующем: в верховьях, а также на притоках характерны резкие колебания уровней (быстрые, высокие подъёмы), в среднем течении реки (при выходе реки в котловину и ниже) колебания уровней имеют весьма сглаженный характер, что обусловлено «распластыванием» паводков и регулирующим влиянием развитой заболоченной поймы. Уровни подъема

воды над критическим уровнем небольшие. Глубина затопления поймы не превышает 1,0–1,5 м, но при этом значительно увеличиваются площади (зоны поражения), а также длительность стояния высоких отметок уровня из-за относительно небольших уклонов земной поверхности. Максимальная глубина затопления за период наблюдений составляет 253 см. При экстремальных паводках на отрезке впадения реки в оз. Байкал в связи с поднятием уровня озера происходит подпор воды, что затрудняет естественный сток. Участок при впадении реки характеризуется интенсивным подтоплением низинных прибрежных территорий. В связи с поднятием уровня и постоянного подтопления прибрежной части территории с. Усть-Баргузин село перенесено с правобережной части поймы на левобережье (терраса оз. Байкал).

Выделяются основные многоводные периоды, в которых регистрируется серия наводнений на реках бассейна р. Баргузин: 1931–1942 гг.; 1966–1975 гг. 1984–1992 гг. Периодичность 9, 16–24 лет. В настоящее время – наступление очередного многоводного периода с высокой вероятностью наводнений.

Территориальный анализ предполагаемых ущербов по административным районам свидетельствует, что показатели рисков для районов равны. Для Курумканского района он составляет 49,8 %; Баргузинского – 50,2 %. При масштабном наводнении оба района несут значительные потери для сельскохозяйственной отрасли.

Применение геоинформационной технологии для параметризации рельефа способствовало автоматизации операций геоморфологического дешифрирования и анализа ЦМР, обеспечило объективную дифференциацию территории бассейна р. Баргузин на отдельные гидрологические участки, характеризующиеся схожими физико-географическими параметрами развития наводнений, а также снизило субъективизм экспертных решений и полученных результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (№ АААА-А21-121011990023-1 и № FWSU-2026-0009).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воронова А. Е., Рублев И. В., Соловьева И. А., Панов Д. Ю., Гордеева О. С., Батанов Д. В., Завьялова Д. Ю., Косторная А. А. Спутниковый мониторинг экстремального наводнения в Иркутской области 2019 года. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 263–266.
2. Шаликовский А. В., Лепихин А. П., Тиунов А. А., Курганович К. А., Морозов М. Г. Наводнения в Иркутской области 2019 года. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 6. С. 48–65.
3. Дугарова Г.Б. Анализ и оценка последствий наводнения в г. Тулуне (Иркутская область). ЭКО. 2021. № 1 (559). С. 130–150.
4. Василевская Л. Н., Лисина И. А., Василевский Д. Н., Агеева С. В., Подвербная Е. Н. Метеорологические условия формирования сильного наводнения в бассейне реки Амур в 2019 году. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 90–108.
5. Кондратьева Л. М., Уткина А. С., Кулаков В. В. Изменение качества подземных вод в зоне речной фильтрации во время наводнения на реке Амур. Вода: химия и экология. 2019. № 3-6. С. 7–14.
6. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Лупян Е. А. Мониторинг последствий наводнения в Оренбургской области при половодье на реке Урал в 2024 году. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 339–347.
7. Libra: браузер для открытых спутниковых снимков Landsat 8 [Электронный ресурс]. <https://libra.developmentseed.org/> (дата обращения 13.03.2022).
8. Топографическая карта. М-6 1:100 000. М. : КБ «Панорама», 2015. 16 л.
9. Бурятский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/cgms/3072/> – (дата обращения 25.06.2022).
10. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms. 1987. Vol. 12(1). P. 47–56.

11. Skidmore A. A. Comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. // International Journal of Geographical Information Systems. 1989. № 3(4). P. 323–334.
12. Zhou Q., Liu X. (2004). Error Analysis on Grid-Based Slope and Aspect Algorithms. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(8), 957–962.
13. Pike R.J. Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis. Progress in Physical Geography, 2000. Vol. 24.
14. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science, vol. 33. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). 2008. 772 p.
15. Florinsky I. V. (2016). Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Elsevier // Academic Press, Amsterdam. 486 p.
16. Saga GIS: System for Automated Geoscientific Analyses [Электронный ресурс] <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (дата обращения 13.08.2024).
17. Михеев В. С. Ряшин В. А. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М. : ГУГК, 1977. 4 листа.
18. Кичигина Н. В. Корытный Л. М. Районирование Восточной Сибири по опасности наводнений. География и природные ресурсы. 1997. № 3. С. 50–60.
19. Оценка и управление природными рисками. Тематический том. Под ред. А. Л. Рогозина. М.: Изд-во «КРУК», 2003. 320 с.
20. Борисова Т. А. Теоретико-методические подходы исследования природно-антропогенных рисков на Байкальской природной территории // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 2. С. 40–45.
21. Карта сельскохозяйственных угодий Республики Бурятия М-6 1:100 000. М.: ЦПИП «ВИСХАГИ-Центр», 2015. 8 л.
22. Борисова Т. А. Природно-антропогенные риски в бассейне оз. Байкал. – Новосибирск. Изд-во «ГЕО», 2013. 126 с.

REFERENCES

1. Voronova, A. E., Rublev, I. V., Solovieva, I. A., Panov, D. Yu., Gordeeva O. S., Batanov D. V., Zavyalova D. Yu., Kostornaya, A. A. (2020). Satellite monitoring of extreme flooding in the Irkutsk region in 2019. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 17(1), 263–266 [in Russian].
2. Shalikovskiy, A. V., Lepikhin, A. P., Tiunov, A. A., Kurganovich, K. A., Morozov, M. G. (2019). Floods in the Irkutsk region in 2019. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye [Water management of Russia: problems, technologies, management]*, 6, 48–65 [in Russian].
3. Dugarova, G. B. (2021). Analysis and assessment of the consequences of the flood in Tulun (Irkutsk region). *Eko [ECO]*, 1 (559), 130–150 [in Russian].
4. Vasilevskaya, L. N., Lisina, I. A., Vasilevsky, D. N., Ageeva, S. V., Podverbnaya, E. N. (2020). Meteorological conditions for the formation of severe floods in the Amur River basin in 2019. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological research and forecasts]*, 2 (376), 90–108 [in Russian].
5. Kondratieva, L. M., Utkina, A. S., Kulakov, V. V. (2019). Changes in groundwater quality in the river filtration zone during the flood on the Amur River. *Voda: khimiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]*, 3(60). 7–14 [in Russian].
6. Shinkarenko, S. S., Bartalev, S. A., Lupyan, E. A. (2024). Monitoring the consequences of flooding in the Orenburg region during the flood on the Ural River in 2024. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa]*, 21(3), 339–347 [in Russian].
7. Libra: browser for open satellite images Landsat 8. Retrieved from <https://libra.developmentseed.org/> (date of access 03.13.2022) [in English].
8. Topographic map (2015). Scale 1:100 000. Moscow: KB "Panorama", 16 sheets [in Russian].
9. Buryat Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Retrieved from <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/cgms/3072/> (date of access 06.25.2022) [in Russian].

10. Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R. (1987). Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47-56 [in English].
11. Skidmore, A. A. (1989). Comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 3(4). 323-334 [in English].
12. Zhou, Q., Liu, X. (2004). Error Analysis on Grid-Based Slope and Aspect Algorithms. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(8), 957-962 [in English].
13. Pike, R.J. (2000). Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24 [in English].
14. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. (2008). Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). 33. 772 p. [in English].
15. Florinsky, I. V. (2016). Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. *Elsevier, Academic Press, Amsterdam*. 486 p. [in English].
16. Saga GIS: System for Automated Geoscientific Analyses. Retrieved from <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (date of access 13.08.2024) [in English].
17. Mikheev, V. S. Ryashin, V. A. (1977). Map “Landscapes of the south of Eastern Siberia”. M. : GUGiK, 4 sheets [in Russian].
18. Kichigina, N. V., Korytny, L. M. (1997). Zoning of Eastern Siberia by flood hazard *Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and natural resources]*, 3, 50–60 [in Russian].
19. Assessment and management of natural risks. Thematic volume. (2003). Ed. A.L. Rogozin. – Moscow: Publishing house “KRUK”, 320 p. [in English].
20. Borisova, T. A. (2010). Theoretical and methodological approaches to the study of natural and anthropogenic risks in the Baikal natural territory. *Life safety [Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti]*, 2, 40-45 [in Russian].
21. Map of agricultural lands of the Republic of Buryatia (20150. Scale 1:100 000. Moscow: TsPIP "VISKHAGI-Center", 8 sheets [in Russian].
22. Borisova, T. A. (2013). *Natural and anthropogenic risks in the Lake Baikal basin [Prirodno-anthropogennyye riski v bassejne oz. Baykal]*. Novosibirsk: Publishing house "GEO", 126 p. [in Russian].

Об авторах

Андрей Николаевич Бешенцев – доктор географических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией геоинформационных систем.

Татьяна Анатольевна Борисова – кандидат географических наук, старший научный сотрудник.

Author details

Andrey N. Beshentsev – DSc, Professor of the RAS, Head of the Laboratory of Geoinformation Systems.

Tatyana A. Borisova – PhD, Senior Researcher.

Получено / Received 26.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 13.11.2025

Принята к публикации / Accepted 20.04.2026

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.94:519.63

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-75-83>

Способ 3D-визуализации горного отвода на основе дискретной воксельной модели для анализа пространственных процессов

Л. Н. Бурмин¹✉

¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

e-mail: LNBurmin@mail.ru

Аннотация. Цель исследования заключается в создании рационального способа моделирования горного отвода, включающего оптимальный алгоритм интерполяции данных разведочных скважин, визуализацию модели горного массива, формирование цифровой дискретной модели и возможность моделирования поведения углепородного массива в различных имитационных ситуациях. Для достижения поставленной цели на первом этапе исследования необходимо решить ряд задач: выбрать алгоритм визуализации и интерполяции, определить структуру для хранения и манипулирования модельными данными, реализовать базовый алгоритм в виде компьютерной программы для изучения возможной работоспособности выбранного решения и существующих ограничений. Для выбора рационального алгоритма проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов визуализации, их достоинств и недостатков при визуализации получаемых результатов исследования предметной области. Для решения задачи хранения и манипулирования данными в модели предлагается подход создания структуры данных, представляющей собой реализацию дискретизации трехмерного пространства конечными трехмерными блоками (чанками) с возможностью рекурсивной декомпозиции на несколько более подробных объектов, повторяющих родительскую структуру. Каждый конечный объект такой модели может обладать собственными свойствами, что позволит моделировать напряженно-деформированное состояние углепородного массива. Для реализации компьютерной программы, обладающей достаточной для решения поставленных задач функциональностью, использован трехмерный движок Unity. Проведены синтетические тесты, позволяющие сделать положительный вывод о возможности построения трехмерной графической модели, сопоставимой по объему и масштабу с горным отводом в условиях ограничений в аппаратных ресурсах. Сделан вывод, что предложенный способ дискретизации может быть применим для дальнейших задач моделирования.

Ключевые слова: горный массив, ГИС, горное дело, геоинформатика, алгоритмы построения 3D-изображений

Для цитирования:

Бурмин Л. Н. Способ 3D-визуализации горного отвода на основе дискретной воксельной модели для анализа пространственных процессов. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 75–83. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-75-83>

3D visualization method of a mining lease based on a discrete voxel model for analysis of spatial processes

L. N. Burmin¹✉

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

e-mail: LNBurmin@mail.ru

Abstract. The study proposes an efficient method for modeling mining lease areas, comprising an optimized interpolation algorithm for exploration borehole data, visualization of the rock-mass model, construction of a discrete digital representation, and simulation of coal-bearing massif behavior under diverse scenarios. The initial phase addresses the following tasks: selection of suitable visualization and interpolation algorithms; definition of a data structure for storage and manipulation of model information; and implementation of a prototype algorithm as a software application to assess the feasibility and limitations of the proposed approach. A comparative analysis of existing visualization algorithms was conducted to identify the most appropriate technique, evaluating their advantages and limitations with respect to the study objectives. To address the problem of data storage and manipulation, a hierarchical discretization data structure is proposed, which partitions three-dimensional space into finite volumetric blocks (chunks) with support for recursive decomposition into progressively finer child elements that inherit the parent topology. Each final element may be assigned distinct physical and mechanical properties, enabling representation of the stress-strain state of the coal-rock mass. A prototype implementation was developed in the Unity 3D engine. Synthetic experiments demonstrate the practicability of constructing a three-dimensional graphical model comparable in extent and scale to an actual mining lease while operating under limited hardware resources. The findings suggest that the proposed discretization method is suitable for subsequent modeling and simulation tasks.

Keywords: rock mass, GIS, mining, geoinformatics, 3D image generation algorithms

For citation:

Burmin L. N. (2026). 3D visualization method of a mining lease based on a discrete voxel model for analysis of spatial processes. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 75–83. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-75-83>

Введение

Среди актуальных направлений исследований Земли [1–3] в области геодезии, геоинформатики и картографии особое внимание уделяется проблемам визуализации результатов моделирования участков горного производства. Кроме того, в современных работах отмечается растущая роль цифровых технологий и виртуальной реальности при подготовке персонала и анализе горных процессов [4, 5]. Теоретические и методические аспекты представления геопространственных данных имеют важное прикладное значение в горном деле, особенно при моделировании различных стадий разработки месторождений. Задача построения трехмерной модели пространства горного отвода обусловлена необходимостью проведения имитационного моделирования для определения вероятности риска обрушения горной породы в области подземных очистных выработок. Авторы разных научных работ [6, 7] отмечают, что исследование динамических процессов разрушения горных пород с использованием геоин-

формационных технологий позволит более достоверно получать результаты прогнозирования опасных участков, что поможет скорректировать план эвакуации работников или изменения технологии процесса выемки угля для предотвращения аварийных ситуаций.

Другой задачей является моделирование геофизических данных [8, 9] и способа хранения трехмерных объектов с учетом анализа их пространственных свойств как в статическом состоянии, так и в динамическом, а также существующих в этой области математических и компьютерных методов [8]. Разработка схемы месторождения полезных ископаемых в трехмерном пространстве позволит предприятиям повысить рациональное использование природных ресурсов, технических средств, горного оборудования и т. п., что позволит формировать комплекс управленческих решений для проведения мероприятий в области обеспечения безопасности ведения горных работ.

Ряд исследований в области 3D-моделирования подтверждает эффективность компьютерных систем визуализации для анализа состояния массива [10]. Для наглядного пред-

ставления процессов выемки угля развиваются программные продукты 3D-моделирования, разрабатываются новые технологии в предметной области, которые позволяют повысить качество моделирования [1]. Прогресс развития системы моделирования в разных отраслях горной промышленности приводит к потребности описания структуры взаимодействия различных объектов горного предприятия для проектирования горнотехнических систем. Сложность проектирования горных выработок заключается в их пространственном расположении: очистные выработки должны находиться вдоль линии простирания пласта. Поэтому одним из важных этапов в оценке состояния горного массива является трехмерная модель полезных ископаемых.

Среди основных проблем, которые многие авторы современных исследований оставляют без внимания, можно выделить такие, как построение визуальной модели объектов больших масштабов с достаточным уровнем визуализации детализации, недостаточная эргономика и удобство управления трехмерными компьютерными моделями, недостаточно универсальный способ хранения и манипулирования данными, полученными в результате моделирования. Существует гипотеза, что в итоговом результате эргономичность работы может быть значительно повышена за счет предоставления реализации возможности интерактивной работы с любой частью модели горного массива, в том числе посредством построения среза по любой плоскости и декомпозиции локальной области горного массива на составные элементы для детального анализа свойств смещения и напряжения.

Методы и материалы

Целью данного исследования является определение рационального способа построения модели горного отвода шахты с применением современных технологий визуализации для декомпозиции локальных областей напряженно-деформированного состояния угленосного массива. Поскольку породный массив имеет неоднородную структуру и включает как зоны подземных выработок, так и отрабо-

танные борты, то необходимо учитывать неравномерное распределение тектонических сил путем расчета вертикальных и горизонтальных смещений и напряжений в окрестности ведения горных работ. Это позволит рассматривать горный отвод как единую горнотехническую систему с учетом положения горных выработок и применяемого оборудования.

Для этого необходимо решить ряд задач: определить алгоритм построения трехмерной поверхности; разработать структуру данных для хранения сведений об объекте моделирования; выбрать подходящий инструментальный визуализации. Основным объектом исследования является напряженно-деформированное состояние массива в близости горных выработок.

В качестве исходных данных выступают имитационные данные о разведочных скважинах, включающие координаты на поверхности земли, глубину, виды породы на разной глубине залегания, замеры мощности залегания и идентификатор каждой скважины. У каждой породы в свою очередь определены геомеханические свойства, которые необходимы для расчета напряженно-деформированного состояния в горном массиве. По этим данным требуется построить цифровую модель горного массива и визуализировать ее в виде трехмерного компьютерного изображения.

Определение алгоритма визуализации. Существует несколько алгоритмов построения 3D-моделей с использованием средств компьютерной графики: *marching cubes*, *dual contouring*, *marching tetrahedra*, *surface nets* [11–13]. Рассмотрим перечисленные технологии.

Алгоритм *marching cubes* [11] прост в реализации, однако у него есть ряд недостатков: избыточное количество операций, потенциальная возможность дефектов в модели, невозможность создавать резкие перепады в изоповерхности.

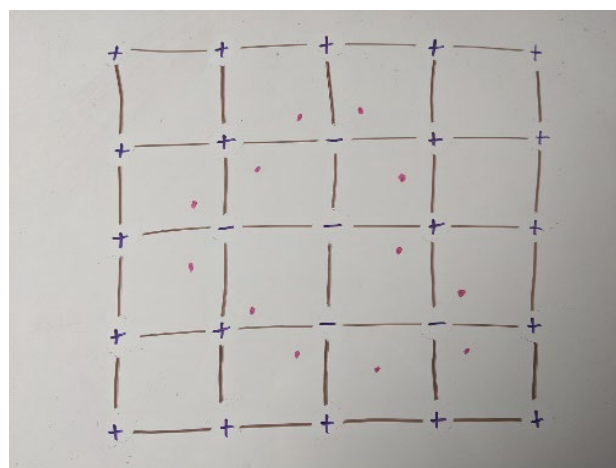
Dual contouring некоторым образом позволяет преодолеть эти проблемы и более удобен с точки зрения потенциального масштабирования модели [13]. Недостаток алгоритма *dual contouring*, по сравнению с *marching cubes*, состоит в том, что вычислить ячейки отдельно не представляется возможным. Для соедине-

ния точек и нахождения конечной гипсометрии обязательно нужно просмотреть соседние ячейки. Тем не менее с точки зрения реализации это более простой алгоритм, чем шагающие кубы.

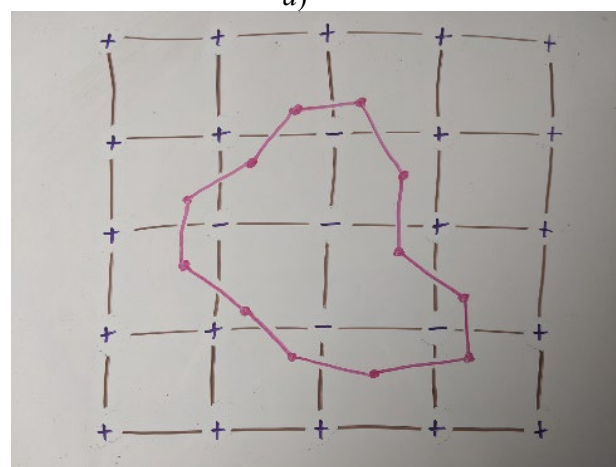
Marching tetrahedra (марширующие тетраэдры) имеют девятнадцать пересечений граней на куб, в то время как для шагающих кубов нужно всего двенадцать. Однако одно из этих пересечений не получится использовать вместе с соседним кубом, который стоит на главной диагонали. Если такое пересечение использовать совместно на гранях куба, то это усложняет реализацию алгоритма и потребует больше оперативной памяти во время выполнения. С другой стороны, дополнительные пересечения дают немного лучшее разрешение выборки.

Surface nets – алгоритм, использующий сетку вершин. Он применяет к вершинам определенный алгоритм сглаживания [12]. Это позволяет осуществлять построение трехмерной визуальной модели горного массива без применения дополнительных методов интерполяции. В процессе сглаживания крайне важно учитывать, чтобы вершина не покидала границ своего вокселя (трехмерного пикселя, в нашем случае – куба). Для данного алгоритма нужно представить сетку кубов в виде развертки, в которой будет осуществляться визуализация с учетом того, что каждый воксель в действительности является не кубом, а точкой в трехмерном пространстве.

Каждый воксель хранит в себе значение функции расстояния со знаком в углу сетки. Для каждого куба в сетке нужно определить, где возможно найти точку изоповерхности, если она принципиально существует. Далее нужно изучить 8 углов куба. Если в них есть сочетание разных знаков, то в этой области есть точка поверхности (рис 1, а). Точно так же можно рассматривать 12 ребер куба. Если ребро соединяет две точки (вокселя) с разными знаками, то на ребре должна быть какая-то точка поверхности, т. е. этот край пересекает поверхность. Затем просматриваются все такие ребра в кубе и усредняются их точки пересечения поверхностей (рис 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Визуализация алгоритма (знаки – это воксели по углам кубов):

- а) точки означают точки на поверхности;
б) сегмент линий образуют поверхность

Создание структуры данных. Цель итоговой работы заключается в построении среза по любой плоскости и декомпозиции части массива на отдельные элементы для моделирования изменения их свойств. Для решения требуется определить, каким образом будут описаны данные для наиболее комфортного оперирования в программном коде. Следует рассмотреть несколько альтернативных подходов.

Первый метод – массив плоскостей породных слоев. Представляет собой набор точек, где каждая точка содержит следующую информацию: координаты относительно поверхности (x, z); начальная высота (y_0); конечная высота (y_1); материал наполнения данного слоя (рис. 2).

Второй – трехмерное воксельное пространство (неограниченное трехмерное координированное пространство, где каждая точка является независимой трехмерной дискретой – вокселем). Воксель содержит следу-

ющие данные: координаты в пространстве (x , y , z); материал (наполнение данной точки). Общим свойством для данных подходов будет зависимость точности от размера минимального сегмента.

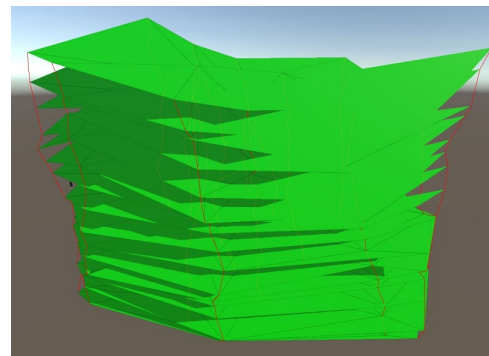
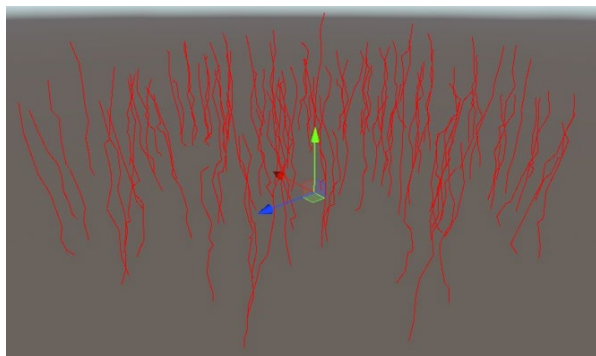


Рис. 2. Визуализация плоскостей породных слоев

Поскольку необходимо совершать моделирование свойств отдельных частей горного отвода, то для представления данных крайне важно иметь возможность отделить некоторые сегменты данных для их более подробного исследования. С этой точки зрения наиболее оптимальной структурой данных целесообразнее выбрать трехмерное воксельное пространство, расширив эту структуру разбиением на отдельные сегменты пространства – чанки.

Каждый чанк содержит в себе 4 096 вокселей, которые составляют трехмерный куб с размерами $16 \times 16 \times 16$. Затем данные сегменты пространства группируются в секции по 64 элемента, которые также представляют собой куб, но с размерами $4 \times 4 \times 4$. Далее эти сегменты будут именоваться как килочанк (262 144 отдельных вокселей), мегачанк (16 777 216 отдельных вокселей) и гигаханк (1 073 741 824 отдельных вокселей) соответственно. Поскольку создание меша является достаточно затратной операцией, то формирование итоговых мешей, которые будут непосредственно отрисовываться движком, планируется осуществлять на уровне килочанков.

Выбор инструментария для реализации. Для визуализации моделей горных отводов было принято решение использовать одну из трехмерных сред динамической визуализации как основу, содержащую необходимые

средства по работе с графикой, интерфейсом и пользовательским вводом. Также было необходимо учесть особенности требований к аппаратной части.

Из рассмотренных платформ в качестве основных кандидатов сопоставлялись Unity и Unigine. Обе платформы обладают высоким уровнем оптимизации и гибкости. Преимущество Unity заключается в более обширном сообществе, высокой производительностью рендера графики в стандартной конфигурации, а также широком выборе итоговых операционных систем для компиляции программного обеспечения, включая мобильные устройства [14–16].

Основой архитектуры была выбрана модульная структура. Это позволит испытать различные способы построения итоговой визуализации и обработки входных данных, не внося критических изменений в архитектурное ядро программной реализации.

Платформа Unity изначально предлагает разработчику компонентную структуру объектов: итоговое приложение состоит из сцен, которые содержат в себе пользовательский интерфейс, различную логику и динамическое содержание. Объекты сцены, также известные как GameObject, представляют собой иерархическую структуру в виде дерева, где каждый элемент может иметь множество раз-

личных компонентов, определяющих его логику взаимодействия.

Результаты

В качестве наиболее рационального алгоритма для задачи визуализации горного отвода был выбран алгоритм surface nets. Основным аргументом при его выборе является оптимальный баланс между результирующим числом вершин и точностью описываемой поверхности на крупном горизонте моделирования. На горизонте исследования в несколько километров моделируемой области алгоритмы marching cubes и marching tetrahedra оказываются слишком требовательными к аппаратным ресурсам относительно времени вычисления. С учетом особенностей выбранного метода трехмерного воксельного пространства при реализации было принято несколько решений. Во-первых, отделить меши Unity от всех операций создания и редактирования, ограничив взаимодействие только непосредственным созданием базового экземпляра и установкой его вершин и треугольников при соответствующих операциях. Во-вторых, использовать структуру данных, позволяющую иметь минимальное число объектов сцены.

Для проверки выбранных решений была разработана минимальная работоспособная программная реализация алгоритма surface nets. Экспериментальные исследования проводились на имитационных данных, моделирующих информацию о разведочных скважинах, что является распространенным подходом на ранних этапах разработки и валидации алгоритмов. В результате было получено, что построение модели для объема данных размером $32 \times 32 \times 32$ чанка занимает около 7,5 минут и требует около 2,7 ГБ оперативной памяти. Проседание частоты кадров в режиме реального времени при использовании данных такого типа не превышает 3 кадров в секунду. Дополнительно были проведены эксперименты на мобильных платформах с целью предварительной оценки работоспособности алгоритма в условиях ограниченных аппаратных ресурсов. Результаты показали, что при использовании синтетических данных алгоритм демонстрирует стабильную ра-

боту и приемлемые показатели производительности даже на маломощных мобильных устройствах. Вместе с тем следует отметить, что полученные результаты относятся к идеализированному набору данных и не учитывают возможную неоднородность, зашумленность и масштаб реальных полевых геофизических данных. Потенциал повышения производительности алгоритма в дальнейшем связан с возможностью его масштабирования за счет применения многопоточной обработки и оптимизаций, ориентированных на работу с большими объемами реальных данных.

На рис. 3 представлена визуализация результирующей дискретной модели, отражающая структуру воксельного пространства и сформированную изоповерхность горного массива. Изображение иллюстрирует принцип организации данных и характер получаемой геометрии.

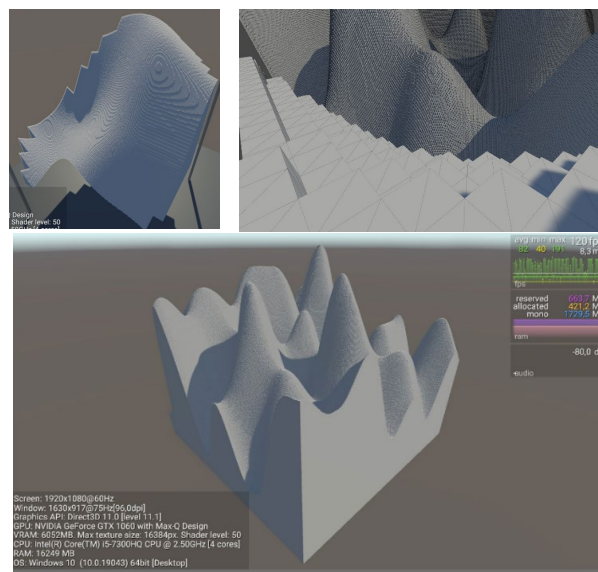


Рис. 3. Пример визуализации дискретной воксельной модели горного отвода, сформированной с использованием алгоритма surface nets

При подобном подходе, когда модельные данные дополняются визуализацией, появляется возможность в «покадровом» отслеживании процесса изменения напряжения и смещения при ведении горных работ. Построенная в результате модельная поверхность поз-

воляет локализовать области обрушения или частичного проседания горной породы путем наложения условной плоскости для построения сечений по пороговому значению напряжения и смещения. Сам процесс визуализации при этом не требователен к аппаратным ресурсам, если область моделирования не выходит за пределы одного кубического километра горного отвода.

Обсуждение

Стоит отметить, что у описанного решения существует ряд недостатков, требующий некоторых улучшений в будущем исследовании. Алгоритм визуализации и архитектурная структура данных, описанная в статье, может быть адаптирована под различные особенности конкретного горного отвода, однако инструмент реализации имеет ряд значительных ограничений, о которых следует упомянуть. Логика взаимодействия компонентов, необходимых для выполнения, постоянно зависит от глобальных контроллеров, отслеживающих события API Unity. Как правило, наиболее часто вызываются `FixedUpdate` и `Update`. При этом нужно помнить, что создание и удаление `GameObject` сами по себе затратные операции, очень неэффективные по памяти и времени [15]. Также необходимо учитывать то, что API данного движка не является потокобезопасным [15]. Следовательно, крайне важно проработать корректный алгоритм работы и синхронизации действий между потоками. Эти свойства приводят к следующим выводам: нужно избегать множественного создания объектов сцены в одном кадре; следить, что число объектов сцены находится в допустимых пределах; крайне важно, чтобы операции внутри `FixedUpdate()` и `Update()` укладывались во временные рамки.

Зная особенности платформы, стоит установить следующие ограничения реализации: все дорогостоящие действия должны иметь минимальное число зависимостей от Unity API; необходимо минимизировать вызовы стандартного API для работы с мешами, используя собственные промежуточные структуры данных; итоговая реализация должна уметь масштабировать рабочие потоки.

Также стоит отметить, что полученные результаты целесообразно проверить на реальных данных либо на имитационных моделях, значительно приближенных к действительно существующим объектам, чтобы полноценно убедиться в приемлемой эффективности выбранных решений.

Заключение

В результате исследования был проведен сравнительный анализ алгоритмов трехмерной визуализации, в процессе которого в качестве наиболее рационального был выбран `surface nets`. Предложена структура данных для программной реализации алгоритма и выбран наиболее гибкий в контексте задачи инструмент реализации – платформа Unity. Полученные в результате исследования инструменты визуализации позволят повысить удобство работы с данными о напряженно-деформированном состоянии модели углепородного массива. Методы визуализации позволят наглядным образом выявлять области смещения и напряжения для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Предлагаемый способ моделирования может быть использован в системах поддержки принятия решений при планировании и анализе горных работ, в том числе для визуального анализа состояния горного массива, оценки зон повышенного риска и подготовки инженерно-технических решений. Кроме того, разработанный подход может применяться в учебно-тренировочных и имитационных системах, а также в составе геоинформационных систем горных предприятий.

В будущем планируется использовать полученную программную реализацию для построения произвольных сечений и разметки локальной области горного отвода с указанием свойств конкретных конечных элементов. Это в перспективе позволит моделировать и визуализировать динамические процессы обрушения горной породы в подземной очистной горной выработке для обеспечения дополнительных мер безопасности в процессе добычи полезного ископаемого.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Burmin L. N., Stepanov Yu. A., Marchenko V. A. Computer visualization and zoning parameters of technogenic impact on the environment. *Scientific Visualization*. 2017. Vol. 9. No. 1. С. 137–145.
2. Новиков А. В., Паневников К. В., Писарев И. В. Многофункциональная система безопасности угольных шахт: визуализация событий (горнотехнических процессов) с рабочего места шахтера. *Горная промышленность*. 2021. № 5. С. 65–69.
3. Артамонов Е. Б., Головач Ю. Ю., Остапенко В. А. Модификация принципов визуализации контента в информационных системах. *Magyar Tudományos Journal*. 2020. № 47. С. 50–52.
4. Гендлер С. Г., Гришина А. М. Обоснование риск-ориентированного подхода к совершенствованию системы обучения подземного персонала угольных шахт нормам и правилам техники безопасности. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2018. № 4. С. 24–33.
5. Бартош В. С. Виртуальная реальность: новые методы подготовки личного состава МЧС. ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. С. 204–209.
6. Шек В. М., Соболева М. Ю. Использование имитационного моделирования для оптимизации проведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. № 10. С. 201–205.
7. Киршина Е. В., Колокольникова А. И. Геоинформационные системы и промышленная безопасность угольных предприятий. *Безопасность жизнедеятельности предприятий*. Кемерово : КузГТУ, 2017. С. 404.
8. Ногин С. А., Усанов С. В. Моделирование системы «Горные выработки – крепь – вмещающие породы» в программной среде визуализации. *Проблемы недропользования*. 2021. № 1 (28). С. 42–49.
9. Цивилева А. Е. Развитие производственно-технологического потенциала предприятий угольной промышленности на основе внедрения цифровых технологий. *Научный вестник ОПК России*. 2022. № 1. С. 56–63.
10. Скворцов А. В., Мирза Н. С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. – Томск : Изд-во Томского университета, 2006. 168 с.
11. Lorensen W. E., Cline H. E. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *Computer Graphics*. 1987. Vol. 21, № 4. P. 163–169.
12. Hansen C. D., Johnson C. R. *Visualization Handbook*. Academic Press, 2004. P. 7–11.
13. Raposo A. N., Gomes A. J. P. Pi-surfaces: products of implicit surfaces towards constructive composition of 3D objects. *Journal of WSCG*. 2019. arXiv:1906.06751.
14. Карелова Р. А., Коробейников П. С. Контроль над проектом на Unity: частые проблемы начинающих разработчиков и пути их решения. *МНИЖ*. 2020. № 5-1 (95). С. 47–50.
15. Трохова Т. А. Компьютерное моделирование динамических объектов с использованием среды разработки компьютерных игр Unity. *Агротехника и энергообеспечение*. 2018. № 1 (18). С. 74–80.
16. Цветков В. Я., Мордвинов В. А., Матчин В. Т. Технология генерации виртуальных ландшафтов с применением метода вокселизации и волюметрических данных. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2023. № 1 (42). С. 91–99.

REFERENCES

1. Burmin, L. N., Stepanov, Yu. A., & Marchenko, V. A. (2017). *Computer visualization and zoning parameters of technogenic impact on the environment*. *Scientific Visualization*, 9(1), 137–145.
2. Novikov, A. V., Panevnikov, K. V., & Pisarev, I. V. (2021). *Multifunctional safety system of coal mines: Visualization of events (mining processes) from the miner's workplace*. *Gornaya Promyshlennost' [Mining Industry]*, (5), 65–69 [in Russian].
3. Artamonov, E. B., Golovach, Yu. Yu., & Ostapenko, V. A. (2020). *Modification of visualization principles of content in information systems*. *Magyar Tudományos Journal*, (47), 50–52.
4. Gendler, S. G., & Grishina, A. M. (2018). *Substantiation of a risk-oriented approach to improving the training system of underground coal mine personnel in safety rules*. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle [Tula State University News. Earth Sciences]*. (4), 24–33 [in Russian].

5. Bartosh, V. S. (2010). *Virtual reality: New methods of training the personnel of the Ministry of Emergency Situations Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*, Vol. 1, No. 3. 204–209 [in Russian].
6. Shek, V. M., & Soboleva, M. Yu. (2005). *Use of simulation modeling to optimize mining operations. Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten' [Mining information and analytical bulletin]*, (10), 201–205 [in Russian].
7. Kirshina, E. V., & Kolokolnikova, A. I. (2017). *Geoinformation systems and industrial safety of coal enterprises. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatiy [Safety of Industrial Enterprises in Industrially Developed Regions]* (pp. 404). Kemerovo: Kuzbass State Technical University [in Russian].
8. Nogin, S. A., & Usanov, S. V. (2021). *Modeling of the “Mine Workings – Support – Surrounding Rocks” system in a visualization software environment. Problemy Nedropol'zovaniya [Problems of subsoil use.]*, 1(28). 42–49 [in Russian].
9. Tsvileva, A. E. (2022). *Development of the production and technological potential of coal industry enterprises through the introduction of digital technologies. Nauchnyy Vestnik OPK Rossii [Scientific Bulletin of the Defense Industrial Complex of Russia]*, (1). 56–63 [in Russian].
10. Skvortsov, A. V., & Mirza, N. S. (2006). *Algorithms for constructing and analyzing triangulation [Algoritmy postroeniya i analiza triangulyatsii]*. Tomsk: Tomsk University Press. 168 [in Russian].
11. Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). *Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics*, 21(4), 163–169.
12. Hansen, C. D., & Johnson, C. R. (2004). *Visualization Handbook*. San Diego: Academic Press. 7–11.
13. Raposo, A. N., & Gomes, A. J. P. (2019). *Pi-surfaces: Products of implicit surfaces towards constructive composition of 3D objects. Journal of WSCG*. arXiv:1906.06751.
14. Karelova, R. A., & Korobeynikov, P. S. (2020). *Project control in Unity: Common problems of novice developers and ways to solve them. MNIZH [MNIZH]*, 5-1(95). 47–50 [in Russian].
15. Trokhova, T. A. (2018). *Computer modeling of dynamic objects using a game development environment Unity. Agrotehnika i Energoobespechenie [Agrotechnics and Energy Supply.]*, 1(18). 74–80 [in Russian].
16. Tsvetkov V. Ya., Mordvinov V. A., Matchin V. T. (2023). *Technology for Generating Virtual Landscapes Using the Voxelization Method and Volumetric Data. Obrazovatel'nyye resursy i tekhnologii. [Educational Resources and Technologies]*. No. 1 (42). 91–99 [in Russian].

Об авторе

Леонид Николаевич Бурмин – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых технологий.

Author details

Leonid N. Burmin – PhD, Associate Professor, Department of Digital Technologies.

Получено / Received 13.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.12.2025

Принята к публикации / Accepted 22.04.2026

Научно-теоретическая статья/Theoretical article

УДК 528.94

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-84-93>

**Основные принципы выполнения картографической визуализации
и критерии их реализации**

Т. С. Молокина¹✉

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

e-mail: molokinat@inbox.ru

Аннотация. За последние десятилетия в области представления картографической информации произошли революционные изменения, связанные с возрастающим объемом и количеством отображаемой информации, а также с изменением способов ее представления. Картографическая визуализация является связующим звеном между компьютерными технологиями и зрительной системой человека, влияющей на восприятие. Для классических карт принципы картографического отображения были сформулированы много десятилетий назад, однако главными отличительными чертами современных карт становятся интерактивность и динамика. Карта из пассивно воспринимаемой иллюстрации превращается в активно используемый инструмент в процессе мышления пользователей при решении задач пространственного анализа. В статье рассмотрены основные принципы выполнения картографической визуализации. Обозначены основные проблемы-противоречия, связанные с картографической визуализацией, с учетом сформулированных принципов.

Ключевые слова: картографическая визуализация, геовизуализация, геоаналитика, большие данные

Для цитирования:

Молокина Т. С. Основные принципы выполнения картографической визуализации и критерии их реализации. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 84–93. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-84-93>

Core principles of cartographic visualization and criteria for their implementation

T. S. Molokina¹✉

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

e-mail: molokinat@inbox.ru

Abstract. Over recent decades, cartographic representation has undergone a profound transformation, prompted by the increasing volume and complexity of information requiring visualization as well as changes in the methods of its presentation. Cartographic visualization serves as an interface between digital technologies and the human visual system, thereby influencing cognitive perception, spatial comprehension, and the interpretation of geospatial information. Although the principles underlying classical cartographic representation were established several decades ago, interactivity and dynamism have become defining characteristics of contemporary mapping. As a result, maps have evolved from static visual representations into active analytical instruments that support exploration of spatial relationships, development of spatial reasoning, and solution of complex geospatial problems. The article examines the core principles of cartographic visualization and discusses the principal conceptual tensions that emerge in their implementation.

Keywords: cartographic visualization, geovisualization, geoanalytics, big data

For citation:

Molokina T. S. (2026). Core principles of cartographic visualization and criteria for their implementation. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 84–93. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-84-93>

Введение

Одним из важнейших инновационных направлений развития современной картографии является картографическая визуализация, которая связана с отображением огромных массивов (часто неструктурированных) данных, с геоаналитикой, без которой в настоящее время сложно представить многие сферы человеческой деятельности: политику, экономику, образование, экологию и т. д.

Главными отличительными чертами современных карт становятся интерактивность и динамика. Картографическая визуализация становится средством взаимодействия, обеспечивающим необходимую поддержку процесса принятия решений.

Картографическая визуализация является связующим звеном между компьютерными технологиями и зрительной системой человека, влияющей на восприятие. Благодаря картографической визуализации стало возможным представление больших данных из различных источников в графической форме для зрительного осознания их человеком с целью построения гипотез, формулирования идей, научного анализа, прогнозирования, принятия решений.

Информационная насыщенность современного мира, развитие информационных технологий, разнообразие источников и скорость формирования данных, диктуют необходимость научных разработок в области картографической визуализации. С использованием технологий искусственного интеллекта стало возможным автоматизировать процесс создания новых решений в картографической визуализации, систематизировать и формализовать знания, накопленные картографами, переводя их в машиночитаемую форму.

Формализацию знаний для картографической визуализации можно условно разделить на четыре основных этапа:

1) систематизация всех имеющихся знаний по правилам оформления карт различной

тематики и назначения, а также разработка новых решений картографического дизайна;

2) разработка баз знаний допустимых и оптимальных вариантов отображения математической основы карты (варианты проекций, масштабные ряды и диапазоны, координатные сетки, варианты компоновок и т. д.), общегеографической основы, тематического содержания, а также разработка системы критериев выбора отображения элементов картографической визуализации в зависимости от технических характеристик устройства использования (размер и калибровка экрана устройства и т. д.), мерности и степени динамичности карты, учитывая при этом предполагаемую область применения результата картографической визуализации;

3) перевод законов и правил допустимых и оптимальных вариантов картографической визуализации в машиночитаемую форму, посредством языков программирования;

4) разработка методов количественной оценки качества картографической визуализации.

Формализация знаний в области картографической визуализации должна базироваться на ряде принципов, отражающих ее текущее состояние и учитывающих перспективы развития.

Методы и материалы

Для рассмотрения основных принципов, которые следует учитывать при выполнении картографической визуализации, необходимо проанализировать основные ее определения и направления исследований, а также определения геовизуализации, поскольку это понятие по сути является очень близким к картографической визуализации, однако имеет свои отличительные особенности. Термин «географическая визуализация» (сокращенно – геовизуализация) появился с переходом картографии в цифровую эпоху и описывается во многих научных трудах. По мнению ряда авторов, геовизуализация представляет

собой процесс интерактивной визуализации пространственных данных большого объема из различных источников на любом из этапов пространственного анализа посредством новых технологий [1–9] с использованием достижений в области когнитивного подхода [1, 8]. При этом визуализация направлена на индивидуальное интерактивное взаимодействие пользователя с интерфейсом, с целью обнаружения закономерностей, интерпретации результатов и принятия наиболее рациональных решений, посредством проведения различных манипуляций с пространственными данными (панорамирование, масштабирование, перемещение, включение и отключение доступных слоев, проведение геопространственного анализа, добавление собственных данных и т. п.) [4].

Картографическая же визуализация трехмерной модели местности по мнению авторов статьи [5] – это метод преобразования цифровой трехмерной модели земной поверхности в удобное для зрительного восприятия изображение в соответствии с картографическими законами.

В монографии [10] было предложено следующее определение картографической визуализации – это технологический процесс научно-обоснованного отображения пространственно-временных данных и знаний по картографическим законам в удобное для зрительного восприятия изображение с возможностью интерактивного взаимодействия.

В настоящее время все исследования в области картографической визуализации затрагивают обширные области смежных наук, та-

ких как психология, статистика, аналитика, информатика, дизайн и т. д., поэтому авторы многих научных публикаций говорят о необходимости осуществления скоординированного междисциплинарного взаимодействия картографии и геоинформатики с другими научными направлениями [11–17]. В табл. 1 представлено подразделение исследований в области картографической визуализации на три условные группы: анализ и обработка данных для картографической визуализации; отображение геопространственных данных; восприятие картографической информации пользователем.

1. Анализ и обработка данных для картографической визуализации.

Поскольку геовизуализация тесно связана с геоаналитикой, то, в первую очередь, она направлена на использование больших данных, характеризующихся значительными объемами, высокой скоростью передачи, разнообразием, высоким разрешением, гибкостью, исчерпывающим охватом и достоверностью [11].

Множество новых научных исследований в области геоаналитики основаны на решении проблем, связанных с извлечением больших данных и их интеграцией из разных источников, разработкой стандартов кодирования и словарей пространственных данных для последующего их отображения в графической форме и т. д. Важную роль играют исследования, направленные на решение проблем связанных данных для возможности их повторного использования [11, 12, 18–20].

Таблица 1. Группы исследований картографической визуализации

Исследования в области картографической визуализации			
Название групп исследований	I группа	II группа	III группа
	Анализ и обработка данных для картографической визуализации	Отображение геопространственных данных	Восприятие картографической информации пользователем
Примеры решаемых задач	- разработка алгоритмов и правил интеграции различных типов данных; - разработка правил интеграции данных, относящихся к разным предметным областям и стандартам; - разработка стандартов кодирования и словарей пространственных данных	- отображение пространственных данных в графической форме; - разработка внешнего вида данных в зависимости от технических возможностей; - выбор способов отображения в зависимости от типов данных; - разработка дизайна интерфейса; - разработка внешнего вида данных в зависимости от действий пользователя; - исследования в области психофизиологии восприятия	
Близкие научные направления	Статистика, аналитика, информатика	Дизайн, эргономика, информатика	Социология, психология, физиология, эргономика

2. Отображение геопространственных данных.

Важным направлением в исследованиях картографической визуализации является отображение имеющихся данных в графической форме [16], выбор способов отображения в зависимости от типов данных, запросов пользователя, разработка критериев оценки эстетических качеств картографической визуализации и т. д. Данное направление тесно связано с искусством и картографическим дизайном, например, в источнике [17] обсуждается возможность использования таких сочетаний цветов на картах, как в произведениях искусства художественных течений различных времен.

3. Восприятие картографической информации пользователем.

Все более широкий круг пользователей активно использует картографическую визуализацию в повседневной жизни для определения местоположения, получения информации, решения различных задач [21]. Таким образом, явно прослеживается тенденция к персонализации карт, поэтому особое внимание в исследованиях картографической визуализации уделяется правильному восприятию картографической информации человеком и вопросам удобства взаимодействия пользователя с картой для принятия эффективных решений, с учетом теории когнитивной психологии [11, 12, 14, 18, 19–23].

Результаты

Основываясь на пункте 4.2. ГОСТ Р 70846.6 (ГОСТ Р 70846.6: Визуализация пространственных данных, – Москва, 2023. – URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/818/81868.pdf> – Текст : электронный), пункте 3 ГОСТ Р 70955 (ГОСТ Р 70955—2023. Картография цифровая. Термины и определения, – Москва, 2023. – URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/813/81365.pdf> – Текст : электронный), ГОСТ 21667-76 (ГОСТ 21667-76 Картография. Термины и определения – Москва, 1976. – URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/81/8199.pdf> – Текст : электронный), рассмотренные ранее определения и группы исследований, можно сформулировать основные принципы, которые

необходимо соблюдать при выполнении картографической визуализации.

1. Мгновенная скорость создания. Поскольку карты в современном мире, в большинстве случаев, участвуют в решении повседневных задач и часто воспринимаются пользователями как временный информационный ресурс, то мгновенная скорость картографической визуализации стала ее неотъемлемой частью. Создание карт посредством онлайн-сервисов позволяет отображать и настраивать карту в режиме реального времени, делая возможным добавление или изменение данных с очень высокой скоростью.

2. Наличие инструментов геоанализа. Очень важным инструментом в современном мире является геоаналитика, занимающаяся проблемами, связанными с географическим пространством и различными объектами, событиями, явлениями и процессами. Она тесно связана с использованием больших данных, поэтому картографическая визуализация должна предусматривать возможность использования больших данных и знаний для исследования и понимания различных процессов и явлений на основе их географического положения. При этом картографическая визуализация должна опираться на исследования в области интеллектуального статистического анализа данных и машинного обучения.

3. Ориентированность на пользователя. Еще одним важным принципом картографической визуализации, является персонализация, т. е. ориентирование на пользователя. Чтобы карта была наиболее полезной, необходимо предусматривать возможность настройки графического отображения информации в соответствии с потребностями и предпочтениями пользователя. Пользовательские настройки являются важным условием успешной передачи информации с карты пользователю, при этом необходимо учитывать возможность создания собственной карты на основе загруженных данных, а также адаптации картографической визуализации к конкретным задачам. Напрямую с этим принципом связаны исследования в области взаимодействия пользователя с интерфейсом, которые должны включать не только глубокое изучение целевых пользователей и возможных комбинаций сце-

нариев использования карты, но и оценку удобства восприятия информации.

4. Адаптивность картографической визуализации. Развитие компьютерных и мобильных технологий диктует требование для картографической визуализации, связанное с ее адаптивностью к различным устройствам, т. е. возможность корректного отображения карт и интерфейса на различных дисплеях (ноутбук, планшет, смартфон, электронная доска и т. д.) для более эффективного и удобного использования.

5. Интерактивность картографической визуализации. Поскольку картографическая визуализация является важным инструментом для пользователя при решении различных задач геопространственного анализа, то очевидно, что этому должна способствовать динамическая интерактивная среда, которая предполагает не только изучение карты пользователем, но и возможность внесения изменений в ее содержание, на основе выбора по интересующему запросу. Интерактивность картографической визуализации позволяет активно использовать карту благодаря таким инструментам, как масштабирование, перемещение, работа со слоями, просмотр дополнительной информации, построение маршрутов, поиск и т. д. При этом пользователь может создавать карту, изменять ее элементы, фильтровать содержимое, менять режим отображения карты и т. д. Картографическая визуализация должна обеспечивать возможность проведения основных измерений по карте (определение координат, измерение расстояний, площадей и т. д.).

6. Эстетическая привлекательность результата картографической визуализации. С развитием различных графических редакторов появилось множество инструментов компьютерной графики, которые дают возможность создавать эстетически привлекательные карты. Эстетика в картографической визуализации служит визуальным языком, эффективно передающим информацию и направляющим взаимодействие с пользователями. Она не только связана с визуальной привлекательностью карты, создающей вовлеченность пользователя, привлекая внимание, но и отвечает за простоту использования и правильность понимания карт, а также их эргономичность.

7. Математический закон построения. Картографическая визуализация должна использовать математические законы построения картографических проекций, которые динамически изменяются в зависимости от масштабирования и охвата картографируемой территории, учитывая при этом анализ распределения искажений в соответствии с назначением карты.

8. Мультимасштабность и генерализованность. Картографическая визуализация должна позволять выбирать оптимальную детализацию карты, посредством мультимасштабности, позволяя быстро осуществлять переход от одного масштаба к другому с целью извлечения картографической информации необходимой степени обобщения. При выборе определенного масштаба пользователем в интерактивном режиме должно меняться и содержание карты, с учетом особенностей генерализации.

В России и за рубежом все более активно начали создаваться картографические сервисы и программы, позволяющие представить огромное количество разнообразных геопространственных данных, отражающих самые различные аспекты состояния и развития окружающей действительности. В то же время большинство таких сервисов и программ представляют собой: 1) либо сложный программный продукт, требующий специализированных знаний в области геоинформатики; 2) либо сервис по созданию геоизображений территории, не имеющих координатной привязки; 3) либо сервисы, содержащие возможности создания карт, но ограниченные по наличию визуальных и аналитических инструментов.

Таким образом, в первом варианте существуют проблемы моментального создания карт и использования таких сервисов и программ неподготовленными пользователями. Во втором варианте существуют проблемы привязки объектов карты к реальным координатам и выполнения пространственного анализа. В третьем варианте возникают проблемы и сложности использования максимально широкого спектра возможностей дигитайна на картографической основе.

Табл. 2 содержит основные критерии, по которым можно оценить соответствие картографической визуализации рассмотренным принципам.

Таблица 2. Критерии корректной реализации принципа

Принцип	Критерии соответствия принципу	Признаки нарушения реализации принципа (примеры ошибок)
Мгновенная скорость создания	Данные о событиях (пробки, аварии, очаги возгорания и т. д.) автоматически отображаются на карте в реальном времени с минимальной задержкой; данные автоматически классифицируются и стилизуются, согласно предустановленным правилам, исключая необходимость предварительной обработки со стороны пользователя; а любые изменения в базе данных сразу отображаются на карте без ручного обновления	Наблюдаются расхождения между данными в БД и их отображением на карте; после каждого обновления требуется ручная проверка слоёв и корректировка картографом — из-за задержки данные устаревают и теряют актуальность для оперативных решений
Наличие инструментов геоанализа	Поддерживается импорт пользовательских данных разных форматов; картографический интерфейс обеспечивает выполнение ключевых операций геопространственного анализа (оверлей, буферизацию, сетевой анализ, кластеризацию и др.) с автоматической визуализацией результатов — в виде новых слоёв, буферных зон, маршрутов или тепловых карт	Функционал карты ограничен средствами визуализации и навигации; возможности карты ограничены просмотром данных и поиском объектов (по названию или координатам) — импорт данных, создание слоёв и геопространственный анализ не поддерживаются
Ориентированность на пользователя	Любой пользователь может самостоятельно загружать свои данные, определять набор отображаемых категорий, настраивать интервалы шкал и их цветовые схемы и т. д. Содержание карты адаптируется под уровень пользователя; карта сохраняет настройки (область интереса пользователя, слои, фильтры, историю поиска и т. д.), переводит топонимы на родной язык пользователя и использует стандартные единицы измерения для определенного региона	Интерфейс не предусматривает пользовательской настройки и загрузки собственных данных; категории отображения, интервалы шкалы и цветовые схемы предопределены и неизменяемы; настройки интерфейса сбрасываются — слои и область просмотра приходится настраивать заново
Адаптивность	Все элементы карты корректно отображаются на экранах любого размера и во всех браузерах; интерфейс карты поддерживает адаптацию визуальных параметров: корректировку яркости и насыщенности под условия освещения (например, специальный ночной режим для комфортной навигации в тёмное время суток)	При статичной вёрстке наблюдается некорректное отображение элементов карты на различных устройствах, например, их взаимное перекрытие, выход масштабной линейки за границы экрана, недостаточный размер кнопок и условных знаков для комфортного взаимодействия
Интерактивность	Картографический интерфейс содержит инструменты навигации, измерений, фильтрации данных, поиска объектов по атрибутам, управления временными параметрами, точкой обзора, настройкой визуализации (прозрачность, включение/отключение тематических слоёв) и т. д.	Отсутствуют базовые возможности управления картой и стандартные инструменты добавления, удаления или скрывания тематических слоёв и объектов
Эстетическая привлекательность	Карта оформлена в едином графическом стиле: используются гармоничные цветовые палитры, читаемые шрифты с чёткой иерархией по размеру и начертанию, минималистичные условные знаки без лишних эффектов, а элементы карты распределены сбалансированно без образования визуально пустых зон или участков с избыточной плотностью элементов, что обеспечивает комфортное восприятие и хорошую читаемость	Из-за слишком ярких цветов, дисгармоничной цветовой схемы, лишних эффектов и большого количества разных шрифтов карта плохо читается и выглядит нецелостно. Может наблюдаться нарушение иерархии, когда второстепенные элементы привлекают больше внимания, чем основные
Математический закон построения	Наличие полноценной математической основы карты: проекции, масштабного ряда, системы координат — обеспечивает точность пространственного отображения объектов и создаёт необходимые условия для проведения геоаналитических операций. Выбор картографической проекции обоснован целевой задачей: приоритет отдаётся минимизации тех видов искажений, которые влияют на точность ключевых расчетов	Без полноценной математической основы карта становится схематичной иллюстрацией, а применение проекций с существенными искажениями делает её непригодной для точных измерений и геоанализа
Мультимасштабность и генерализация	Использование логически обоснованного масштабного ряда способствует согласованному отображению пространственных данных на разных уровнях детализации. Изменение состава и подробности отображения объектов в соответствии с текущим масштабом обеспечивает целостность восприятия картографического материала на всех уровнях масштабного ряда	Карта привязана к одному масштабу, что исключает возможность корректного отображения объектов при попытке изменить масштаб

Обсуждение

Можно сформулировать несколько противоречий-проблем, связанных картографической визуализацией при учете сформулированных принципов:

1) картографической визуализацией как очень наглядным инструментом геоаналитики стремятся пользоваться все чаще, но при этом в процессе картографической визуализации участвуют не только специалисты, но и неподготовленные пользователи, которые не обладают достаточными знаниями в области геоинформатики, программирования, картографии и дизайна, что приводит к созданию плохо оформленных карт, которые не передают нужную информацию или передают ее с ошибками;

2) сервисы, позволяющие быстро создавать картоподобные изображения неподготовленным пользователем, выполняют роль только интерактивной иллюстрации без возможностей определения координат и проведения полноценного геоанализа, кроме того, имеют ограниченное количество шаблонов и инструментов для отображения всех возможных вариантов тематического картографирования;

3) имеющиеся шаблоны и инструменты для быстрого и интерактивного создания карт в большинстве сервисов разрабатываются программистами и дизайнерами, но очень редко в решении таких вопросов участвует картограф, что зачастую приводит к ошибкам в восприятии информации;

4) создание карт на основе программ ГИС, поддерживающих возможности проведения полноценного геопространственного анализа,

предполагает наличие профессиональных навыков в картографическом дизайне и геоинформатике, а также достаточно трудоемко и энергозатратно, что исключает возможность их использования неподготовленными пользователями.

Таким образом, решение сформулированных проблем возможно посредством экспертной системы, созданной на основе интегрированных знаний из областей картографии, геоинформатики, психологии, физиологии, аналитики и статистики. Ключевым условием ее разработки выступает формализация знаний в сфере картографической визуализации, которая должна учитывать сформулированные выше принципы.

В последующих публикациях будут детально рассмотрены основные задачи, требующие решения для обеспечения качественной формализации знаний для картографической визуализации, а также предложены возможные пути их реализации.

Заключение

Картографическая визуализация играет большую роль в информационном обеспечении таких областей деятельности человека, как экономика, наука, образование, туризм, строительство и т. д., поэтому должна удовлетворять требованиям современного мира. При этом она должна облегчать пользователю понимание огромного количества неструктурированных данных из различных источников и учитывать все принципы, которые были сформулированы ранее, для выполнения качественной картографической визуализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. MacEachren A. M., Gahegan M., Pike W. Geovisualization for knowledge construction and decision support. *Computer Graphics and Applications*. 2004. Vol. 24, No. 1, P. 13–17.
2. Valêncio C., Kawabata T., Medeiros C., 3D Geovisualisation Techniques Applied in Spatial Data Mining. 9th international conference on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. 2013. P. 57–68. DOI: 10.1007/978-3-642-39712-7_5.
3. Coltekin A., Janetzko H., Fabrikant S. I. Geovisualization. *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge* (2nd Quarter 2018 Edition). University of Zurich, 2018. DOI 10.22224/gistbok/2018.2.6.
4. Молокина Т. С., Колесников А. А. Анализ состояния и перспективы развития визуализации пространственных данных. *Вестник СГУГиТ*. 2021. Т. 26, № 4. С. 73–82.
5. Лисицкий Д. В., Бугаков П. Ю. Картографическая визуализация трехмерных моделей местности. *Вестник СГГА*. 2011. Вып. 3 (16). С. 87–93.
6. Balla D., Zichar M., Tóth R., Geovisualization Techniques of Spatial Environmental Data Using Different Visualization Tools. *Applied Sciences*. MDPI, 2020. Vol. 10, No. 19. DOI: 10.3390/app10196701.

7. Hepburn J., Fairbairn D. Testing geovisualisations for effective environmental engineering decisionmaking. Abstracts of the ICA. 2019. Vol. 1. P. 111–112. DOI 10.5194/ica-abs-1-111-2019.
8. Jiang B., Huang B., Vasek V. Geovisualisation for Planning Support Systems. Planning Support Systems in Practice. Advances in Spatial Science. Springer, Berlin, Heidelberg. 2003. P. 177–191. DOI 10.1007/978-3-540-24795-1_10. 14.
9. Mohan M. Geospatial information from satellite imagery for geovisualisation of smart cities in India. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B8. P. 979–985. DOI 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-979-2016.
10. Андрюхина Ю. Н., Бугаков П. Ю., Касьянова Е. Л. [и др.] Цифровая картография : монография / под редакцией Д. В. Лисицкого. Новосибирск : СГУГиТ, 2023. 442 с.
11. Robinson A. C., Demšar U., Moore A. B. Geospatial big data and cartography: research challenges and opportunities for making maps that matter. International Journal of Cartography. 2017. P. 32-60. – DOI: 10.1080/23729333.2016.1278151.
12. Dykes J., MacEachren A.M., Kraak M.-J. Exploring Geovisualization. Elsevier Ltd, 2005. 730 p.
13. MacEachren A. M., Kraak M. J. Research Challenges in Geovisualization // Cartography and Geographic Information Science. 2000. Vol.28, No.1. P. 204-207. DOI: 10.1007/BF03544825.
14. Andrienko G., Andrienko N., Keim D. Challenging problems of geospatial visual analytics. Journal of Visual Languages & Computing. 2011. Vol. 22, I. 4, P. 251–256. DOI: 10.1016/j.jvlc.2011.04.001.
15. Schiewe J. Geovisualization and geovisual analytics: the interdisciplinary perspective on cartography. Journal of cartography and geographic information. 2013. Vol. 63, No. 3. P. 122-126 DOI: 10.1007/bf03546122.
16. Susilo H., Rassarandi F.D., Susanta F.F. Exploration of various visual display methods for geovisualization purposes. Prokons: Jurusan Teknik Sipil. 2020. Vol. 14, No. 1. P. 41. DOI: 10.33795/prokons.v14i1.289.
17. Krassanakis V., Skopeliti A., Keskin M. Geovisualization: current trends, challenges, and applications. Geographies. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 801-805. DOI: 10.3390/geographies3040043.
18. Slocum T. A., McMaster R. B., Kessler F. C. Review of thematic cartography and geovisualization (4th ed.). North American Cartographic Information Society CRC Press, 2024 – 612 p. DOI: 10.14714/CP103.1919
19. Huang W., Harrie L. Towards knowledge-based geovisualisation using Semantic Web technologies: a knowledge representation approach coupling ontologies and rules // International Journal of Digital Earth. 2019. P. 1–22. DOI: 10.1080/17538947.2019.1604835.
20. Huang W., Eiðsson E., Harrie L., Multiple Representation for Geospatial Linked Data. Approaches to visualising linked data. Conference on Geoinformation Science (Sweden 21st June 2018) Vol. 2, No. 2, P. 89-124.
21. Vondrakova A., Vozenilek V. User issues in geovisualization. 16 th international multidisciplinary scientific geoconference sgem. Conference Proceedings (Sofia, 2016). Vol. 3. P. 599-606. DOI: 10.5593/SGEM2016/B23/S11.076.
22. Kraak M.-J. Geovisualization illustrated // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 2003. Vol. 57, No. 5. P. 390-399. DOI:10.1016/S0924-2716(02)00167-3.
23. Savelyev A., MacEachren A. M. Advancing the theory and practice of system evaluation: a case study in geovisual analytics of social media. International Journal of Cartography. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 202-221. DOI: 10.1080/23729333.2019.1637488.

REFERENCES

1. MacEachren A. M., Gahegan M., Pike W. (2004) Geovisualization for knowledge construction and decision support. *Computer Graphics and Applications*. Vol. 24, No. 1, 13-17.

2. Valêncio C., Kawabata T., Medeiros C., (2013) 3D Geovisualisation Techniques Applied in Spatial Data Mining. *9th international conference on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*. 57–68. DOI: 10.1007/978-3-642-39712-7_5.
3. Coltekin A., Janetzko H., Fabrikant S. I. (2018) Geovisualization. *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge* (2nd Quarter 2018 Edition). University of Zurich, DOI: 10.22224/gistbok/2018.2.6.
4. Molokina, T. S., Kolesnikov, A. A. (2021) Analysis of the state and prospects for the development of spatial data visualization. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26 (4), 73–82 [in Russian].
5. Lisitsky D. V., Bugakov P. Yu. (2011) Cartographic Visualization of Three-Dimensional Terrain Models // *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3 (16). 87–93. [in Russian]
6. Balla D., Zichar M., Tóth R., (2020) Geovisualization Techniques of Spatial Environmental Data Using Different Visualization Tools. *Applied Sciences*. MDPI, Vol. 10, No. 19. DOI: 10.3390/app10196701.
7. Hepburn J., Fairbairn D. (2019) Testing geovisualisations for effective environmental engineering decisionmaking. *Abstracts of the ICA*. Vol. 1. 111–112. DOI: 10.5194/ica-abs-1-111-2019.
8. Jiang B., Huang B., Vasek V. (2003) Geovisualisation for Planning Support Systems. *Planning Support Systems in Practice. Advances in Spatial Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. 177–191. DOI: 10.1007/978-3-540-24795-1_10. 14
9. Mohan M. (2016) Geospatial information from satellite imagery for geovisualisation of smart cities in India. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLI-B8. 979–985. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-979-2016.
10. Andriukhina, U. N., Bugakov, P. U., Kasyanova, E. L. (2023) *Cifrovaya kartografiya [Digital cartography]*. Novosibirsk: SGUGiT, 442 p. [in Russian].
11. Robinson, A. C., Demšar, U., Moore, A. B. (2017) Geospatial big data and cartography: research challenges and opportunities for making maps that matter. *International Journal of Cartography*, 32–60. DOI: 10.1080/23729333.2016.1278151.
12. Dykes, J., MacEachren, A.M., Kraak, M.-J. (2005) *Exploring Geovisualization*. Elsevier Ltd. 730 p.
13. MacEachren A. M., Kraak M.J. (2000) Research Challenges in Geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*. Vol.28, No.1. 204-207 DOI: 10.1007/BF03544825.
14. Andrienko, G., Andrienko, N., Keim, D. (2011) Challenging problems of geospatial visual analytics. *Journal of Visual Languages & Computing*, 22(4), 251–256. DOI: 10.1016/j.jvlc.2011.04.001.
15. Schiewe, J. (2013) Geovisualization and geovisual analytics: the interdisciplinary perspective on cartography. *Journal of cartography and geographic information*, 63(3), 122–126. DOI: 10.1007/bf03546122.
16. Susilo, H., Rassarandi, F.D., Susanta, F.F. (2020) *Exploration of various visual display methods for geovisualization purposes*. Prokons: Jurusan Teknik Sipil. 14(1), 41 p. DOI: 10.33795/prokons.v14i1.289.
17. Krassanakis, V., Skopeliti, A., Keskin, M. (2023) Geovisualization: current trends, challenges, and applications. *Geographies*, 3(4), 801–805. – DOI: 10.3390/geographies3040043.
18. Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C. (2024) *Review of thematic cartography and geovisualization (4th ed.)*. North American Cartographic Information Society CRC Press, 612 p. – DOI: 10.14714/CP103.1919.
19. Huang, W., Harrie, L. (2019) Towards knowledge-based geovisualisation using Semantic Web technologies: a knowledge representation approach coupling ontologies and rules. *International Journal of Digital Earth*, 1–22. DOI: 10.1080/17538947.2019.1604835.
20. Huang, W., Eiðsson, E., Harrie, L., (2018) Multiple Representation for Geospatial Linked Data. *Approaches to visualising linked data. Conference on Geoinformation Science (Sweden 21st June 2018)*, 2(2), (pp 89-124).

21. Vondrakova, A., Vozenilek, V. User issues in geovisualization. *16 th international multidisciplinary scientific geoconference sgem. Conference Proceedings (Sofia, 2016)*, Vol. 3, 599–606. DOI: 10.5593/SGEM2016/B23/S11.076..
22. Kraak, M.-J. (2003) Geovisualization illustrated. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57(5), 390–399. DOI:10.1016/S0924-2716(02)00167-3.
23. Savelyev, A., MacEachren, A. M. (2019) Advancing the theory and practice of system evaluation: a case study in geovisual analytics of social media. *International Journal of Cartography*, 6(2), 202–221. DOI: 10.1080/23729333.2019.1637488.

Об авторе

Татьяна Сергеевна Молокина – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики.

Author details

Tatyana S. Molokina – PhD, Senior Lecturer, Department of Cartography and Geoinformatics.

Получено / Received 28.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.06.2026

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.94:553.94

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-94-100>

**Методика учета влияния графической точности цифровых карт
при подсчете запасов угольного месторождения**

В. С. Сазонов¹, А. Н. Соловицкий¹✉

¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

e-mail: san.mdig@mail.ru

Аннотация. В статье отражена точность подсчета запасов угольного месторождения в зависимости от масштаба исходного плана и технологии его создания и выделена недостаточная освещенность ее надежности и достоверности, что обосновывает актуальность и востребованность выполненных исследований. Отмечено, что связь расстояния между скважинами и графической точностью карты (плана) является теоретическим обоснованием цели исследования. Выполнена ее формулировка, нацеленная на решение проблемной ситуации, которая обусловлена разнородностью сбора цифровой горно-геометрической информации. На практике реализация предложенной методики учета влияния графической точности цифровых карт при подсчете запасов угольного месторождения (ГТЦК) обеспечивает оптимизацию не только сгущения разведочной сети, но и управления ресурсами, что формирует важную научную задачу экономики региона. Сделаны выводы о значимости моделирования, как неотъемлемой части технологии подсчета запасов угля.

Ключевые слова: подсчет запасов, графическая точность, разведочные сети, мощность, скважина

Для цитирования:

Сазонов В. С., Соловицкий А. Н. Методика учета влияния графической точности цифровых карт при подсчете запасов угольного месторождения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 94–100. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-94-100>

**Assessing the impact of digital map graphical accuracy
on coal reserve estimation: a methodological approach**

V. S. Sazonov¹, A. N. Solovitskiy¹✉

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

e-mail: san.mdig@mail.ru

Abstract. The precision of coal reserve estimation is fundamentally contingent upon the scale and production methodology of the underlying geological mapping. A critical review of the specialized literature reveals a conspicuous paucity of research addressing the reliability and validity of such assessments. This knowledge gap underscores the timeliness and necessity of this study. The theoretical framework of the research is grounded in the established correlation between drill-hole spacing along exploration profiles and the inherent graphical accuracy of the resultant geological maps. The primary objective was formulated to address the challenges arising from the heterogeneity of digital mining-geometric data acquisition. In practical terms, the implementation of the methodology, which integrates cartographic error modeling into the resource estimation workflow, enables the optimiza-

tion of both exploration grid density and subsequent resource management strategies. By mitigating uncertainties associated with digital map graphical accuracy, this approach transcends mere technical refinement; it constitutes a pivotal factor in ensuring the economic stability of the region. It is concluded that error modeling must be regarded as an indispensable component of coal reserve estimation technology.

Keywords: reserves estimation, graphical accuracy, exploration networks, capacity, drill-hole

For citation:

Sazonov V. S., Solovitskiy A. N. (2026). Assessing the impact of digital map graphical accuracy on coal reserve estimation: a methodological approach. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 94–100. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-94-100>

Введение

Актуальность создания цифровых геологических карт не вызывает сомнений, так как обеспечение технологического суверенитета и реализации экономических интересов Российской Федерации невозможно без оперативной информации о добыче ресурсов и их спросе на рынке. Без автоматизации геологических съёмок и оперативности их проведения сбор такой информации затруднен, а точность определения запасов и их динамики не сможет обеспечить конкурентного преимущества [1–3]. На основе выполненного анализа авторы отмечают многообразие источников указанной информации, среди которых доминируют картографические, прежде всего, это планы и разрезы. При этом на стадии геологоразведочных работ получают структурные (подсчетные) планы пластов и геологические разрезы по разведочным линиям, а при добыче полезных ископаемых – планы горных работ. Обеспечение конкурентного преимущества базируется на точности и достоверности указанного картографического обеспечения, развитие которого связано с научными исследованиями следующих ученых: А. В. Аленичева, А. М. Берлянта, И. Г. Журкина, А. Г. Иванова, Е. П. Истомина, А. П. Карпика, Т. П. Литвинова, О. В. Наговицына, М. В. Писаренко, С. П. Присяжнюка, Т. Б. Роговой, С. Н. Сербенюка, В. А. Спиридонова, В. И. Суханова, С. В. Шаклеина, А. Н. Шихова, А. Buckley, С. С. Янкелевич и многих других [4–10]. Их вклад является многоаспектным, включая как развитие теоретических основ, так и методологии, которая принята за основу создания ГТЦК. Выпол-

ненный анализ опубликованных работ свидетельствует о росте моделирования при изучении угольных месторождений, которое стало частью технологии методики геологической оценки угольных месторождений [11–16]. Кроме этого, некоторые исследования акцентируют внимание на особенностях использования различных программных продуктов при подсчете запасов, их представлении и визуализации, что нацелено на расширение и улучшение восприятия [17, 18]. На основе выполненного авторами анализа установлена недостаточная освещенность точности и достоверности ГТЦК, что влияет на определение объёмов и качества полезных ископаемых [19, 20].

Широко применяемые в геологической оценке угольных месторождений цифровые карты в Кузбассе базируются на различном исходном материале, что характеризует проблемную ситуацию, которая отражает разную их точность. Эта ситуация обусловлена разной технологией создания цифровых карт, что отражается на достоверности и надежности подсчета запасов при геологической оценке.

В современных экономических условиях санкционного давления на угольную отрасль роль цифровых карт значительно возрастает в плане роста требований к их точности и использования при оперативном принятии управленческих решений, что является важной научной задачей развития региона. Следовательно, цель исследований обоснована, а разработка методики ГТЦК является решением указанной задачи.

Масштабы запасов и добычи угля в Кузбассе являются доминирующими для Российской Федерации, что обосновывает научную значимость и востребованность разработки

указанной методики, а также необходимость изучения и математической обработки чрезвычайно большого объема разнородной информации. Это подтверждает не только актуальность исследования, но и научный и практический интерес для широкого ряда смежных специалистов как в области картографии, так и геологии и горного дела.

Методы и материалы

Геологическая оценка угольного месторождения выполняется поэтапно, каждый из которых характеризуется увеличением плотности разведочных сетей и объема информации, уточнением запасов, что определяется укрупнением масштаба съемки [21, 22]. Обоснование теоретических основ ГТЦК начнем с рассмотрения одной из двух основных технологий сбора информации на основе сканирования бумажных карт, которая не обеспечивает повышения его точности, что подробно рассмотрено авторами в [23]. Однако, по мнению авторов, в рамках картографической точности может быть создана модель для подсчета, которая опирается на упорядоченную систему сбора информации. Система сбора информации регламентируется величиной шага, зависящего от указанной точности. Предлагаемая авторами расчетная величина шага dx_i , dy_i сбора информации подробно изложена в работе авторов [24]. Указанный шаг в геологической практике определяет расположение скважин. Согласно предложению авторов он связан с масштабом карты

$$dx_{if} \leq dx_i; \quad (1)$$

$$dy_{if} \leq dy_i, \quad (2)$$

где dx_{if} , dy_{if} – фактические расстояния между скважинами.

При невыполнении критериев (1) и (2) необходимо сгущение скважин на основе бурения или моделирования.

Исходя из изложенного выше, методика ГТЦК включает:

– для исследуемого этапа – выбор масштаба картографирования;

– определение количественных значений параметров геологических условий и кондиций и их точности согласно технологии сбора информации;

– создание модели балансовых запасов угольного месторождения с заданной картографической точностью с учетом критериев (1), (2);

– расчеты показателей запасов и их точности по картометрическим показателям;

– анализ полученных результатов и его использования для освоения месторождения и планирования горных работ.

Результаты и обсуждение

Апробация разработанной авторами методики ГТЦК была выполнена для масштаба 1 : 5 000 на основе сканирования бумажного плана одного из угольных месторождений Кузбасса (участка шахты Южная Глубокая Талдинского каменноугольного месторождения) (рис. 1). Информационной основой для подсчета запасов угля изучаемого участка приняты результаты бурения скважин, для обеспечения выполнения критериев (1), (2). Их количество было увеличено путем моделирования, что соответственно привело к возрастанию подсчетных блоков с 19 до 31. Мощность пласта угля на указанных скважинах m_{mi} рассчитана на основе соседних m_{ji} и m_{j+li}

$$m_{mi} = 0,5(m_{ji} + m_{j+li}) \pm \Delta m_{\sigma}, \quad (3)$$

где Δm_{σ} – утроенная средняя квадратическая погрешность определения мощности угольного пласта в соответствующей скважине.



Рис. 1. Схема расположения участка шахты Южная Глубокая

Изменение формы разведочной сети за счет снижения расстояния между профилями до 68 м обеспечило выполнение требования условий учета графической точности топографического плана масштаба 1 : 5 000 (рис. 2). Ранее диапазон изменения указанных расстояний был от 120 до 140 м. Уменьшение расстояния между профилями и скважинами обусловило соответствующие изменения как площадей отдельных фигур подсчетных блоков от 20 094 м² до 112 944 м², так их мощности.

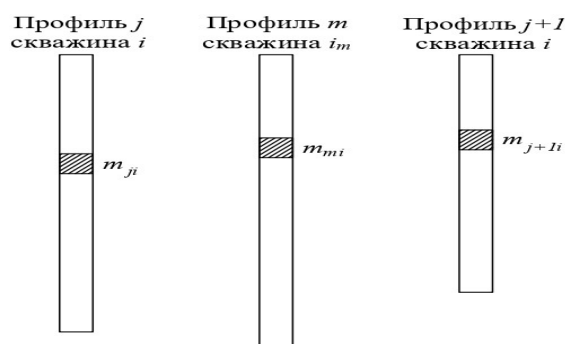


Рис. 2. Схема уменьшения расстояния между скважинами соседних профилей

Мощности подсчетных блоков определены с учетом сгущения разведочной сети скважин, при этом отмечен рост их количества (рис. 3).



Рис. 3. Изменения мощности подсчетных блоков (отдельных фигур)

Величина запасов угля согласно выполненным расчетам равна 9 937 095 433 тонн, а до сгущения разведочной сети – 9 923 273 154 тонн. Средние квадратические погрешности определения запасов угля соответственно равны 9 920 024 и 12 677 860 тонн.

Выполненная авторами апробация разработанной авторами методики ГТЦК на примере участка шахтного поля шахты Южная Глубокая свидетельствует о том, что:

- определены количественные значения параметров геологических условий и кондиций, соответствующие точности масштаба 1 : 5 000 согласно традиционной бумажной технологии сбора информации;
- создана модель балансовых запасов угольного месторождения с заданной картографической точностью с учетом критериев (1), (2) путем сгущения разведочной сети на основе моделирования в любом из применяемых в геологии и горном деле программных продуктов;
- рассчитана величина запасов и их точность, которые равны соответственно 9 937 095 433 и 9 920 024 тоннам, что свидетельствует о повышении надежности геологической оценки;
- анализ полученных результатов отражает уточнение запасов, которые равны 1 382 2279 тонн.

Заключение

Разработанная авторами методика ГТЦК носит интеграционный характер, объединяя моделирование, картографическую и геологическую информации, а также принятую в геологоразведочной практике приуроченность этапа исследований с масштабом картографирования и установленной зависимостью с оптимизацией сгущения разведочной сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Логинов Д. С. Опыт использования геоданных в картографическом обеспечении геологоразведочных работ. Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 5. С. 598–608. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-598-608.
2. Копылова Н. С., Демидова П. М., Колесник О. А., Санникова А. П., Сазонова С. Г. Концептуальные основы отображения пространственных данных в минерально-сырьевом секторе.

Геодезия и картография. 2024. № 8. С. 2–13. DOI 10.22389/0016-7126-2024-1010- 8-2-13. – EDN POWOFK.

3. Чехлар М., Жиронкин С. А., Жиронкина О. В. Цифровые технологии индустрии 4.0 в майнинге 4.0 – перспективы развития геотехнологии в XXI веке. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 80–90.

4. Жуковский Ю. Л., Ишейский В. А., Булдыско А. Д., Гоцул Ю. Д. Роль цифровых технологий в комплексном освоении месторождений твердых полезных ископаемых. Научные междисциплинарные исследования. 2020. № 7. С. 14–19.

5. Рогова Т. Б., Шаклеин С. В., Ярков В. О. Подсчет запасов угольных месторождений. Кемерово, 2010. 112 с.

6. Агафонов И. А., Малофеев Д. Ф. Опыт защиты блочных моделей по угольным месторождениям в ГКЗ. Уголь. 2022. № 3(1152). С. 90–94.

7. Мальцев Е. Н. Сравнение российской и зарубежной систем подсчета запасов твердых полезных ископаемых и практический опыт использования. Глобус. 2022. № 1. С. 44–48.

8. Баранов Ю. Б., Грушин Р. В. Геоинформационные технологии в геологии и недропользовании. Геопрофи. 2006. № 2. С. 4–7.

9. Янкелевич С. С. Современная концепция и методология картографирования. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 3. С. 118–125. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-118-125.

10. Захаров М. С. Картографический метод и геоинформационные системы в инженерной геологии. М. : Лань, 2017. 435 с.

11. Басаргин А. А. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий. Вестник СГГА. 2014. № 1(25). С. 34–39.

12. Бушуев Я. Ю., Федотов Г. С. Компьютерные технологии подсчета запасов. СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2018. 99 с.

13. Бесперстов А. С. Моделирование пластовых месторождений при помощи ГГИС Micromine. Горная промышленность. 2011. № 5(99). С. 86–88.

14. Сапронова Н. П., Федотов Г. С. Особенности моделирования пластовых месторождений в среде ГГИС Micromine. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № S1. С. 38–45.

15. Тедикова А. А., Красноцветов М. А. Использование ГГИС Micromine для моделирования участка угольного месторождения. Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче: сборник тезисов докладов I молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ, Москва, 19–21 февраля 2020 года. М. : Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2020. С. 187–188.

16. Маниковский П. М., Васютин Л. А., Сидорова Г. П. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС. Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27. № 2. С. 6–14. DOI 10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14.

17. Наумов А. Н., Петрова А. С., Днепровская Д. А., Кислицын К. М. Алгоритм проектирования карьеров в горнодобывающем производстве средствами ГГИС «Micromine». Инновационные технологии в технике и образовании: Материалы XIII Международной научно-практической конференции, Чита, 14–15 декабря 2021 года. Чита: Забайкальский государственный университет, 2021. – С. 325–332.

18. Музыка И. М. Применение блочных моделей для повариантного подсчета запасов// Недропользование XXI век. 2020. № 6. С. 88–94.

19. Наставко Е. В., Наставко А. В., Кайзер Ф. Ю., Соловицкий А. Н. О цифровой модели угольного месторождения в Кузбассе в ГГИС Micromine. Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №1 (127). URL: <https://research-journal.org/archive/1-127-2023-january/10.23670/IRJ.2023.127.23> (дата обращения: 24.01.2023). DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.23.

20. Федоров Е. А., Соловицкий А. Н.. Моделирование как составная часть технологии геологоразведочных работ (на примере Низовского каменноугольного месторождения Кузбасса). Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс, 21– 22 мая 2025 г., Новосибирск: сборник материалов в 8 т. Т. 1: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». Новосибирск : СГУГиТ, 2024. № 2. С. 172–177. ISSN 2618-981X.

21. Жмакин Е. Я. Обоснование плотности сети скважин при детальной разведке угольных месторождений Подмосковского бассейна в связи и изменчивостью основных параметров угольного пласта: диссертация ...кандидата геолого-минералогических наук: 04.00.16. Москва, 1973. 167 с.
22. Шаклеин С. В., Рогова Т. Б., Аксенов В. В., Писаренко М. В. Актуализация рекомендаций по плотности сети скважин при разведке угля. Недропользование XXI век. 2024. № 5-6(106). С. 46–53.
23. Соловицкий А. Н., Сазонов В. С. О математическом обеспечении геологической оценки угольных месторождений : сборник статей XXXVII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования». – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2024. С. 191–194.
24. Сазонов В. С., Соловицкий А. Н. Методика анализа точности картографического обеспечения при традиционной технологии геологической оценки угольных месторождений. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30. № 5. С. 78–88. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-78-88.

REFERENCES

1. Loginov D. S. (2021) Experience of using geodata in cartographic support of geological exploration works *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and aerophotography]*, 65(5), 598-608, DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-5-598-608 [in Russian].
2. Kopylova N. S., Demidova P. M., Kolesnik O. A., Sannikova A.P., Sazonova S.G. (2024) Conceptual foundations of displaying spatial data in the mineral resources sector *Geodesy and cartography*, 8, 2-13, DOI 10.22389/0016-7126-2024-1010- 8-2-13 [in Russian].
3. Chekhlar M., Zhironkina S. A., Zhironkina O.V. (2020) Digital technologies of Industry 4.0 in Mining 4.0 – prospects for the development of geotechnology in the 21st century *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 3, 80-90 [in Russian].
4. Zhukovsky Yu. L., Isheysky V. A., Buldysko A. D., Gotsul Yu. D. (2020) The role of digital technologies in the integrated development of solid mineral deposits *Scientific interdisciplinary research*, 7, 14–19 [in Russian].
5. Rogova T. B., Shaklein S. V., Yarkov V. O. (2010) *Estimation of reserves of coal deposits*. Kemerovo, 112 p. [in Russian].
6. Agafonov I. A., Malofeev D. V. (2022) Experience of protection of block models for coal deposits in the State Reserves Committee *Coal*, 3 (1152), 90-94 [in Russian].
7. Maltsev E. N. (2022) Comparison of Russian and foreign systems for estimating reserves of solid minerals and practical experience of use *Globus*, 1, 44-48 [in Russian].
8. Baranov Yu. B., Grushin R. V. (2006) Geoinformation technologies in geology and subsoil use *Geoprofi*, 2, 4–7 [in Russian].
9. Yankelevich S. S. (2024). Modern concept and methodology of cartography *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(3), 118–125. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-118-125 [in Russian].
10. Zakharov M. S. (2017) *Cartographic method and geoinformation systems in engineering geology*. Moscow: Lan, 2017. 435 p. [in Russian].
11. Basargin A. A. (2014) Creation of digital models of mineral deposits using modern technologies *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(25), 34–39 [in Russian]
12. Bushuev Ya. Yu., Fedotov G. S. (2018) *Computer technologies for reserve estimation* St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, 99 p. [in Russian].
13. Besperstov A. S. (2011) Modeling of stratified deposits using GGIS Micromine *Mining industry*,. 5 (99), 86-88 [in Russian].
14. Sapronova N. P., G. S. Fedotov. (2018) Features of modeling of stratified deposits in the GGIS Micromine environment *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'[Mining information and Analytical Bulletin]*, S1, 38-45[in Russian].
15. Tedikova A. A., Krasnotsvetov M. A. (2020) Using GGIS Micromine to model a coal deposit site *In Sbornik materialov Mineral resource base of diamonds, precious and non-ferrous metals -*

from forecast to production: collection of abstracts of reports of the 1st youth scientific and educational conference of TsNIGRI, Moscow, February 19–21, Moscow: Central Research Geological Prospecting Institute of Non-Ferrous and Precious Metals, 2020, 187–188 [in Russian].

16. Manikovskiy P. M., Vasyutich L. A., Sidorova G. P. (2021) Methodology for modeling ore deposits in GIS *Bulletin of the Transbaikal State University*. 27(2), 6–14. DOI 10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14 [in Russian].

17. Naumov A. N., Petrova A. S., Dneprovskaya D. A., Kisilitsyn K. M. (2021) Algorithm for designing quarries in mining using the Micromine GIS system *In Sbornik materialov Innovative Technologies in Engineering and Education: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, Chita, December 14–15*, Chita: Transbaikal State University, 2021. – Pp. 325–332 [in Russian]

18. Muzyka I. M. (2020) Application of Block Models for Variant-Based Reserve Estimation *Subsoil Use in the 21st Century*, 6, 88–94 [in Russian].

19. Nastavko E. V., Nastavko A. V., F. Yu. Kaiser F. Yu., Solovitskiy A. N. (2023) On the digital model of a coal deposit in Kuzbass in GIS Micromine *International Research Journal*, 1 (127). - URL: <https://research-journal.org/archive/1-127-2023-january/10.23670/IRJ.2023.127.23> (date of access: 01/24/2023). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.23 [in Russian].

20. Fedorov E. A., Solovitskiy A. N. (2024) Modeling as an integral part of geological exploration technology (using the Nizovskiy coal deposit in Kuzbass as an example) *In Sbornik materialov Inter-expo GEO-Siberia. XXI International Scientific Congress, May 21–22, 2025, Novosibirsk*: collection of materials in 8 volumes. Volume 1: International scientific conference "Geodesy, geoinformatics, cartography, mine surveying", Novosibirsk: SGUGiT, 2, 172–177. – ISSN 2618-981X [in Russian].

21. Zhmakina E. Ya. Justification of the well network density in detailed exploration of coal deposits of the Moscow basin in connection with the variability of the main parameters of the coal seam: dissertation ... candidate of geological and mineralogical sciences: 04.00.16. Moscow, 1973, 167 p. [in Russian].

22. Shaklein S.V., Rogova T.B., Aksenov V.V., Pisarenko M.V. (2024) Updating of recommendations on the well network density in coal exploration *Subsoil Use of the XXI century*, 5-6 (106), 46-53 [in Russian].

23. Solovitskiy A. N., Sazonov V. S. (2024). On mathematical support for the geological assessment of coal deposits. *In Sbornik nauchnykh statey po materialam XXXVII nauchno-prakticheskoy konferentsii Akruialinie voprosy sovremennoy nauki i obrazovaniya [Proceedings of the XXXVII International Scientific and Practical Conference Topical issues of modern science and education]* (pp. 191-194). Penza: ICNS Science and Education Publ. [in Russian].

24. Sazonov V. S., Solovitskiy A. N. (2025) Methodology for analyzing the accuracy of cartographic support in traditional technology of geological assessment of coal deposits *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30 (5), 78-88. - DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-78-88 [in Russian].

Об авторах

Александр Николаевич Соловицкий – доктор технических наук, профессор кафедры геологии и географии.

Валентин Сергеевич Сазонов – аспирант кафедры геологии и географии.

Author details

Aleksandr N. Solowitskiy – DSc, Professor, Department of Geology and Geography.

Valentin S. Sazonov – PhD Student, Department of Geology and Geography.

Получено / Received 26.01.2026

Поступила после рецензирования / Revised 26.02.2026

Принята к публикации / Accepted 20.04.2026

Научно-теоретическая статья/Theoretical article

УДК 528.94

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-101-107>

Пути совершенствования средств и методов динамического отображения процессов в геопространстве для решения специальных задач

Б. А. Фисич¹✉

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации»,
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: fba7121978@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема перехода современных программно-технических средств отображения местности и динамических процессов на ней для решения специальных задач. Рассмотрен вопрос влияния развития средств мультимедиа на подходы к формированию картографического изображения. Затронуты аспекты применения анимированных картографических изображений, картографирования знаний, ситуационного моделирования, применения аппаратуры спутниковой навигации и материалов дистанционного зондирования Земли, приложения перспективных геоинформационных технологий к решению задач управления и выработке воздействий для корректировки проблемной ситуации. Предлагается комплексный подход к динамической визуализации картографического изображения, включающий подвижность границ отображаемого района, масштаба отображения, особое внимание сосредоточено на динамической визуализации отдельных условных знаков в части локализации, толщин и паттернов контуров, заливки, символики и буквенно-цифровых обозначений внутри условного знака.

Ключевые слова: геопространство, динамическая визуализация, специальные задачи, картографическое цифровое изображение, пространственный объект, проблемная ситуация, язык карты

Для цитирования:

Фисич Б. А. Пути совершенствования средств и методов динамического отображения процессов в геопространстве для решения специальных задач. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 101–107. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-101-107>

**Improving dynamic visualization of geospatial processes:
tools and methods for specialized tasks**

B. A. Fisich¹✉

27th Central Research Institute Ministry of Defense of the Russian Federation,
Moscow, Russian Federation

e-mail: fba7121978@mail.ru

Abstract. This article addresses the challenge of transitioning modern software and hardware systems for terrain representation and dynamic process visualization to support specialized operational tasks. It examines the influence of multimedia technology advancements on approaches to cartographic image generation. Key aspects discussed include the application of animated cartographic imagery, knowledge cartography, situational modeling, the integration of satellite navigation equipment and Earth remote sensing data, and the deployment of advanced geoinformation technologies for man-

agement decision-making and intervention design to modify problem situations. A comprehensive approach to dynamic visualization of cartographic images is proposed, incorporating variability in the boundaries of the displayed area and display scale. Particular emphasis is placed on the dynamic visualization of individual map symbols, including adjustments to localization, line thickness and contour patterns, fill styles, symbology, and alphanumeric labels within symbols.

Keywords: geospace, dynamic visualization, specialized tasks, digital cartographic image, spatial object, problem situation, map language

For citation:

Fisich B. A. (2026). 3 Improving dynamic visualization of geospatial processes: tools and methods for specialized tasks. Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT] Vol. 31, No. 4. pp. 101–107. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-101-107>

Введение

Современное картографирование носит ярко выраженный прикладной характер. Применение картографических изображений тем более эффективно, чем более адаптировано картографическое изображение к решению конкретной задачи. Развитие современных мультимедийных средств отображения способствует адаптируемости картографического изображения под любую решаемую задачу [1, 2].

Технологическая основа отображения состояния пространственных объектов, участка геопространства или геопространства в целом создана [3, 4], основным препятствием для развития технологий применения картографического моделирования является слишком узкое понимание понятия «картографическое изображение» многими специалистами в соответствующих предметных областях и, как следствие, недопонимание возможностей картографического метода в современных условиях.

Постановка задачи

Решение специальной задачи в общем случае является продуктом интеллектуальной деятельности человека – специалиста и руководителя. Решение представляет собой порядок действий по преодолению проблемной ситуации.

Универсальная научная дисциплина, рассматривающая вопрос о разрешении проблемных ситуаций, как таковых – прикладной системный анализ рассматривает создание модели проблемной ситуации как обязательный этап ее разрешения [5]. Такая модель отражает состояние некоторой системы и окру-

жающей ее внешней среды. Степень декомпозиции системы, ее состав и порядок разграничения с внешней средой зависят от особенностей проблемной ситуации и квалификации привлекаемых к ее разрешению специалистов.

Окончательная форма модели проблемной ситуации – представление о ней, сформировавшееся в сознании человека или людей, ищущих решение. Модель, находящуюся в сознании человека, относят к категории «мысленных» моделей [6].

Формирование в сознании человека адекватного представления о проблемной ситуации является само по себе достаточно сложной задачей. Для значительного числа задач весомым, а иногда – определяющим, является пространственный фактор. Пространственный фактор заключается в особенностях расположения на местности элементов системы, в рамках которой решается проблемная ситуация, и окружающих ее элементов внешней среды. Значительная часть специальных задач для своего решения требует учета динамики изменения проблемной ситуации во времени. Требуется учет пространственного и временного факторов одновременно.

Для задач принятия решений с учетом пространственно-временных факторов течения проблемной ситуации требуется гибкий методический аппарат наглядного представления информации с достаточной оперативностью, чтобы своевременно формировать управляющие воздействия.

Предлагаемое решение задачи

Модель проблемной ситуации в общем случае должна представлять собой комплекс-

ное отображение ее во всем многообразии значимых факторов. Для некоторых задач процесс формирования модели проблемной ситуации в сознании разрешающего ее человека протекает быстро и непосредственно через его органы чувств. Пример такой задачи – непосредственное управление автомобилем при движении по дороге. Но это касается только текущей дорожной ситуации. Если рассмотреть проблемную ситуацию несколько шире, то возникает задача прокладки маршрута от текущего местоположения к целевому. Решение такой задачи включает прокладку маршрута с использованием навигационно-картографической информации, определение координат текущего местоположения с использованием бортовой навигационной аппаратуры (например, ГЛОНАСС) и визуального или автоматизированного сличения проложенного маршрута с реальной траекторией транспортного средства. Задача может еще усложниться, если в состав рассматриваемых факторов добавить загруженность дорожной сети, техническое состояние транспортного средства и т. д.

Задача станет значительно сложнее, если необходимо координировать движение нескольких транспортных средств для достижения общей цели.

В некоторый момент сложность задачи не позволяет человеку охватить ее сознанием непосредственно, через органы чувств. Требуются дополнительные средства предварительной обработки информации о проблемной ситуации, которые в совокупности позволяют представить ее в виде, обеспечивающем необходимый уровень восприятия [7, 8].

Именно для таких задач востребованным является применение картографического метода отображения проблемной ситуации.

Классическую карту относят к мысленным моделям, потому что она является продуктом мыслительной деятельности человека, семиотическим образно-знаковым отображением сущностей реального мира различного уровня абстракции из сознания человека-картографа на бумагу. В то же время в современных условиях между сознанием человека и цифровым графическим изображением появились электронные мультимедий-

ные средства автоматизации. Значительная доля рутинных процессов формирования картографического изображения в современных геоинформационных системах выполняется автоматически или с высоким уровнем автоматизации (рис. 1).

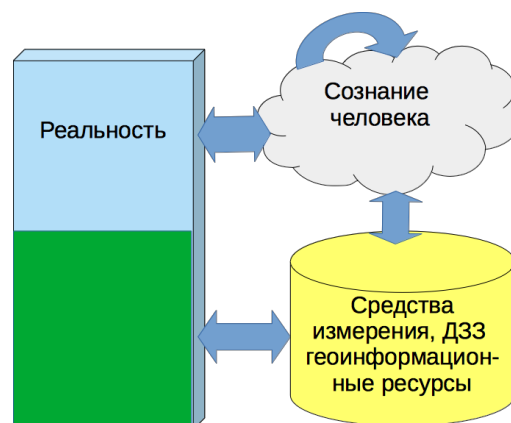


Рис. 1. Перспективная схема отображения проблемной ситуации

Картографированию в настоящее время подвергаются пространственные объекты, явления, протекающие в геопространстве (наиболее яркий пример – карты погоды), геознания [9–12].

Следующий шаг – создание картографических анимаций, призванных отобразить в картографической форме процессы изменения картографируемых объектов, явлений и геознаний с течением времени.

Изменениям подвергается не только технология формирования картографического изображения, но и сам язык карты. Отображение динамических процессов требует картографически отображать нечеткость положения и формы пространственных объектов (особенно – явлений), стохастический характер отображаемых пространственных данных (фактор неопределенности).

Помощь в решении этой задачи может оказать применение методов когнитивной графики, призванных, во-первых, отразить степень относительной значимости картографируемых сущностей и, во-вторых, графически отразить непространственные свойства этих сущностей.

Отдельную задачу представляет картографическое отображение непространственных

свойств группы локально сконцентрированных сущностей – обобщенных показателей тех или иных участков местности как функция пространственных и непространственных свойств объектов и явлений, протекающих на картографируемом участке геопространства в рассматриваемый момент или период времени.

Для отображения динамики картографируемых процессов анимированию могут подвергаться все без исключения элементы формируемого в автоматическом режиме картографического изображения. Динамика изменений может отображаться с использованием двух подходов.

Первый предполагает наличие заранее созданных тематических слоев [13], каждый из которых отображает некоторый момент или промежуток времени. Последовательная визуализация таких слоев обеспечивает анимирование картографического изображения. Такой подход обладает недостаточной степенью автоматизации, требует значительных объемов ручного редактирования картографического изображения, и квалификация картографа оказывает на получаемый результат определяющее влияние.

Второй подход предполагает формирование темпорального объектно-ориентированного геоинформационного ресурса [14–21], содержащего необходимые пространственные данные об объектах и явлениях на исследуемом участке геопространства. Под темпоральностью понимается привязка актуальности элемента данных к моменту или промежутку времени. Привязка ко времени при этом является неотъемлемым компонентом этого элемента данных. При таком подходе особое внимание необходимо уделить применяемой системе условных знаков [22], поскольку необходимо обеспечить наглядность картографического изображения при автоматическом его формировании.

Объектно-ориентированность в данном контексте подразумевает формирование геоинформационного ресурса в оперативной памяти ЭВМ в форме иерархически структурированного массива объектов [23, 24], являющихся экземплярами соответствующих классов (рис. 2).

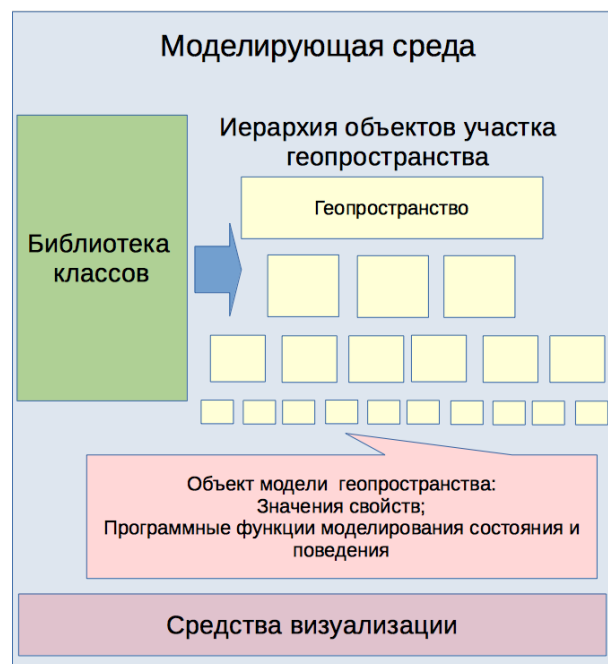


Рис. 2. Структурная схема предлагаемого подхода

Такой подход позволяет:

- формировать временные ряды для анализа динамики изменения тех или иных значимых для решения стоящей задачи показателей, а также прогнозирования их значений в будущем;
- формировать временные «срезы» наборы данных, отражающие комплексное состояние участка геопространства в некоторый момент или промежуток времени;
- вычислять на основании имеющихся данных производные показатели с использованием интегрированного в объект программного кода – методов класса;
- автоматически формировать графическое изображение участка геопространства в любой математической основе из числа поддерживаемых используемой библиотекой классов.

При необходимости с использованием механизмов наследования, полиморфизма и инкапсуляции функционал библиотеки классов может быть расширен в пользовательской реализации.

Заключение

В статье рассмотрен вопрос о совершенствовании существующих подходов к отобра-

жению процессов, протекающих в геопространстве или на отдельных его участках, в интересах решения на территории специальных задач, связанных с обобщением и анализом пространственных данных о быстроменяющейся проблемной ситуации и выработкой на их основе необходимых решений.

В интересах решения поставленной задачи предлагается механизм создания и применения темпорального объектно-ориентированного геоинформационного ресурса.

Предлагаемый подход ориентирован на круг задач оперативного управления в динамично изменяющейся обстановке, требующих высокой степени автоматизации измерений пространственно-временных показателей, обработки данных и визуализации результатов. К числу таких задач следует отнести ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций, мониторинг транспортных потоков и быстротекущих природных процессов, навигацию транспортных средств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лисицкий Д. В., Комиссарова Е. В., Колесников А. А. Мультимедийная картография : учеб. пособие. Новосибирск : СГУГиТ, 2016. 108 с.
2. Берлянт А. М. Виртуальные геоизображения. М. : Научный мир, 2001. 56 с.
3. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий : монография. Новосибирск : СГГА, 2004. 252 с.
4. Елюшкин В. Г. Геоинформационное обеспечение военных действий. От достаточности к превосходству. Барнаул : ИП Колмогоров И. А., 2017. 190 с.
5. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ. М. : КНОРУС, 2010. 224 с.
6. Штофф В. А. Моделирование и философия. М., 1966.
7. Майоров А. А. Пространственное когнитивное моделирование. Перспективы науки и образования. 2014. № 1. С. 33–37.
8. Зенкин А. А. Когнитивная компьютерная графика. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 192 с.
9. Антонов Е. С., Лисицкий Д. В., Янкелевич С. С. Теоретико-методологическое представление прямого перехода от геоинформации к геознаниям. Вестник СГУГиТ. Т. 26. № 2. 2021. С. 82–90.
10. Кандрашина Е. Ю., Литвинцева Л. В., Поспелов Д. А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах. М. : Наука. 1989. 328с.
11. Флегонтов А. В., Терляков О. А. Знания о местности : монография. М.: 29 НИИ МО РФ, 2007. 157 с.
12. Флегонтов А. В., Рутько И. М., Воронов Г. Б. [и др.]. Методы моделирования знаний о местности. Основные теоретические подходы к получению, моделированию и обработке знаний о местности в автоматизированных системах управления. М. : РТУ МИРЭА, 2024. 170 с.
13. Берлянт А. М., Ушакова Л. А. Анимационное картографирование. М.: Научный мир, 2000. 108 с.
14. Egenhofer M. & Golledge R. (1998a), Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems, Oxford University Press, New York.
15. Langran G. Time in Geographic Information Systems. Taylor and Francis, London, 1992.
16. Rigaux P., Scholl M., Voisard A.: Spatial Databases with Application to GIS. Morgan Kaufman, San Francisco. 2002.
17. Nara A. Space-Time GIS and Its Evolution. In Comprehensive Geographic Information Systems; Huang, B., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2018; P. 287–302.
18. Siabato W., Claramunt C., Ilarri S., Manso-Callejo M. Á. A Survey of Modelling Trends in Temporal GIS. ACM Comput. Surv. 2018, 51, 30.
19. Esteban Zimányi, Mahmoud Sakr, Arthur Lesuisse, and Mohamed Bakli. 2019. MobilityDB: A Mainstream Moving Object Database System. In Proceedings of the 16th International Symposium on Spatial and Temporal Databases (Vienna, Austria) (SSTD '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 206–209.
20. Andrienko N., Andrienko G. 2020. Spatio-temporal visual analytics: a vision for 2020s. Journal of spatial information science. N 20, P. 87–95.

21. Hakimi O., Liu H., Abudayyeh O., Houshyar A., Almatared M. and Alhawiti A. 2023. Data Fusion for Smart Civil Infrastructure Management: A Conceptual Digital Twin Framework. *Buildings* 13 (11): 2725.
22. Лютий А. А. Язык карты: сущность, система, функции. Изд-е 2-е, испр. М. : ИГ РАН, 2002. 327 с. с илл.
23. Окунев И. Ю. Основы пространственного анализа : монография. М. : Издательство «Аспект Пресс», 2023. 255 с.
24. Шлеер С., Меллор С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях. Пер. с англ. Киев : Диалектика. 1993. 213 с.

REFERENCES

1. Lisitsky D. V., Komissarova E. V., Kolesnikov A. A. (2016) *Mul'timedijnaja kartografija [Multimedia cartography]* (108 p.). Novosibirsk: SGUGiT [in Russian].
2. Berlyant A.M. (2001) *Virtual'nye geoizobrazhenija [Virtual geo-images]* (56p.). Moscow: Nauchnyj mir [in Russian].
3. Karpik A.P. (2004) *Metodologicheskie i tehnologicheskie osnovy geoinformacionnogo obespechenija territorij [Methodological and technological foundations of geoinformation support of territories]*. Novosibirsk: SGGA, 252 p. [in Russian].
4. Yelushkin V.G. (2017) *Geoinformacionnoe obespechenie voennyh dejstvij. Ot dostatochnosti k prevoshodstvu [Geoinformation support for military operations. From sufficiency to superiority]* (190p.). Barnaul: IP Kolmogorov I.A. [in Russian].
5. Tarasenko F.P. (2010) *Prikladnoj sistemnyj analiz [Applied System Analysis]*. Moscow: KNORUS, 224 p. [in Russian].
6. Shtoff V.A. (1966) *Modelirovanie i filosofija [Modeling and Philosophy]*. Moscow [in Russian].
7. Mayorov A.A. (2014) Spatial Cognitive Modeling. *Perspektivy nauki i obrazovanija [Prospects of Science and Education]*, 1, 33-37 [in Russian].
8. Zenkin A.A. (1991) *Kognitivnaja komp'yuternaja grafika [Cognitive computer graphics]* (192 p). Moscow: Nauka [in Russian].
9. Antonov E.S., Lisitsky D.V., Yankelevich S.S. (2021) Theoretical and Methodological Representation of the Direct Transition from Geoinformation to Geoscience. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(26), 82– 90 [in Russian].
10. Kandrashina E.Yu., Litvintseva L.V., Pospelov D.A.(1989) *Predstavlenie znaniy o vremeni i prostranstve v intellektual'nyh sistemah [Representation of time and space knowledge in intelligent systems]*. Moscow: Nauka, Fizmatlit [in Russian].
11. Flegontov A.V., Terlyakov O.A. (2007) *Znaniya o mestnosti: monografija [Knowledge about the area: a monograph]* (157p). Moscow: 29 NII MO RF [in Russian].
12. Flegontov A.V., Rutko I.M., G.B. Voronov (2024) *Metody modelirovaniya znaniy o mestnosti. Osnovnye teoreticheskie podhody k polucheniju, modelirovaniyu i obrabotke znaniy o mestnosti v avtomatizirovannyh sistemah upravleniya [Methods of terrain knowledge modeling. Basic theoretical approaches to obtaining, modeling, and processing terrain knowledge in automated control systems]* (170p). Moscow: RTU MIRJeA [in Russian].
13. Berlyant A.M., Ushakova L.A. *Animatsionnoe modelirovanie [Animation modelling]* (108 p) Moscow: Nauchnyj mir [in Russian].
14. Egenhofer, M. & Golledge, R. (1998a), *Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems*, Oxford University Press, New York.
15. G. Langran. *Time in Geographic Information Systems*. Taylor and Francis, London, 1992.
16. Rigaux, P., Scholl, M., Voisard, A.: *Spatial Databases with Application to GIS*. Morgan Kaufman, San Francisco, (2002).
17. Nara, A. *Space-Time GIS and Its Evolution*. In *Comprehensive Geographic Information Systems*; Huang, B., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2018; pp. 287–302.

18. Siabato, W.; Claramunt, C.; Ilarri, S.; Manso-Callejo, M.Á. A Survey of Modelling Trends in Temporal GIS. *ACM Comput. Surv.* 2018, 51, 30.
19. Esteban Zimányi, Mahmoud Sakr, Arthur Lesuisse, and Mohamed Bakli. 2019. MobilityDB: A Mainstream Moving Object Database System. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Spatial and Temporal Databases (Vienna, Austria) (SSTD '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 206–209.
20. Andrienko N., Andrienko G. 2020. Spatio-temporal visual analytics: a vision for 2020s *Journal of spatial information science*. N 20, pp. 87–95.
21. Hakimi, O., H. Liu, O. Abudayyeh, A. Houshyar, M. Almatared, and A. Alhawiti. 2023. “Data Fusion for Smart Civil Infrastructure Management: A Conceptual Digital Twin Framework.” *Buildings* 13 (11): 2725.
17. Lyuty A.A. (2002) *Jazyk karty: sushhnost', sistema, funkcii [Map language: entity, system, functions]*. Moscow: IG RAS, 327 p. [in Russian].
18. Okunev I. Yu. (2023) *Osnovy prostranstvennogo analiza [Fundamentals of Spatial Analysis]*. Moscow: Aspect Press Publishing House, 255 p. [in Russian].
19. Schleier S., Mellor S. (1993) *Ob#ektno-orientirovannyj analiz: modelirovanie mira v sootnojenijah [Object-Oriented Analysis: Modeling the World in States]*. Kiev: Dialectics, 213 p. [in Russian].

Об авторе

Борис Алексеевич Фисич – кандидат технических наук, полковник, заместитель начальника центра по научной работе.

Author details

Boris A. Fisich – PhD, Colonel, Deputy Head of the Center for Scientific Research.

Получено / Received 25.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.12.2025

Принята к публикации / Accepted 21.04.2026

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.9:681.5.017

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-108-118>

**Использование принципов локальных климатических зон мегаполиса
для оптимизации сети мониторинга атмосферного воздуха**

С. А. Чигридов¹, Е. Н. Кулик¹✉

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

e-mail: e.n.kulik@snga.ru

Аннотация. Высокая пространственная неоднородность мегаполисов, формирующая уникальные микроклиматические условия в разных частях города, является важным фактором, который не учитывается существующими государственными сетями мониторинга атмосферного воздуха. Данное обстоятельство снижает точность моделей рассеивания загрязняющих веществ и требует разработки научно обоснованных подходов к планированию размещения пунктов сети наблюдения. В исследовании выполнена классификация территории Ленинского района г. Новосибирска по типам локальных климатических зон (Local Climate Zone/LCZ) и дана предварительная оценка потенциальных мест для размещения пунктов мониторинговой сети с привязкой к объектам муниципальной инфраструктуры. В результате выявлены преобладающие и редко встречающиеся типы застройки и покрытий. Определено, что пространственное распределение объектов муниципальной инфраструктуры позволяет обеспечить репрезентативный охват практически всех ключевых LCZ. Сформирован предварительный список и слой векторных данных приоритетных локаций для размещения метеорологических постов. Полученные результаты подтверждают достаточность обоснования пространственного положения пунктов, позволяя перейти к оценке измерительного оборудования и разработке его конструктивного исполнения, а также к последующему детализированному моделированию полей загрязнения атмосферного воздуха.

Ключевые слова: локальные климатические зоны, классификация структуры городской территории, мегаполис, атмосферный воздух, пространственный анализ, оптимизация сети мониторинга

Для цитирования:

Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Использование принципов локальных климатических зон мегаполиса для оптимизации сети мониторинга атмосферного воздуха. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 108–118. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-108-118>

Integrating local climate zones into air quality network design for megacities

S. A. Chigridov¹, E. N. Kulik¹✉

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

e-mail: e.n.kulik@snga.ru

Abstract. The pronounced spatial heterogeneity inherent to megacities generates distinct local microclimatic conditions that remain unresolved by conventional state-run atmospheric monitoring networks. This scale mismatch introduces significant uncertainty into pollutant dispersion modeling and compromises the reliability of air quality assessments. To address this limitation, the authors propose a robust, evidence-based framework for optimizing observational network design. The study opera-

tionalizes the Local Climate Zone (LCZ) classification scheme within the Leninsky District of Novosibirsk as a testbed. The comprehensive typomorphological analysis delineated the distribution of prevailing and sporadic urban fabric types and surface covers across the territory. The findings demonstrate that the existing municipal infrastructure footprint offers sufficient logistical potential to achieve representative spatial coverage of key LCZs identified. Leveraging these insights, a preliminary shortlist of high-priority deployment sites and a corresponding vector data schema for prospective meteorological stations, geo-referenced to the street and road network, were generated. The resulting configuration validates the efficacy of the proposed methodology. The outcomes establish a definitive prerequisite for advancing to subsequent project phases, specifically the technical specification of instrumentation, engineering design of station enclosures, and high-resolution simulation of atmospheric pollution fields.

Keywords: local climatic zones, classification of the urban territory structure, megalopolis, ambient air, spatial analysis, optimization of the monitoring network

For citation:

Chigridov S. A., Kulik E. N. (2026). Integrating local climate zones into air quality network design for megacities. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 108–118. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-108-118>

Введение

Современные мегаполисы представляют собой сложные гетерогенные системы, где сочетание разнообразных типов застройки, искусственных покрытий и естественного ландшафта формирует ярко выраженную пространственную неоднородность микроклиматических условий. Такая пространственно сложная морфология территории существенно влияет на процессы переноса и рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, интерес к мониторингу которых в любом мегаполисе стоит крайне остро. Несмотря на наличие ведомственных (государственных) сетей мониторинга качества атмосферного воздуха, их пространственная разрешающая способность часто оказывается недостаточной для достоверного отражения реальной картины распределения загрязнения в городской среде. Особую актуальность данная проблема приобретает в контексте урбанизированных территорий Сибири, где природно-климатические условия усугубляют неблагоприятные особенности промышленной и жилой застройки. Новосибирск представляет собой репрезентативный объект для проведения исследований такой тематики. В частности, Ленинский район является исторически базовым для многих производственных предприятий, в его границах расположены две ТЭЦ, обеспечивающие теплом и энергией все левобережье города с плотной частной и многоэтажной городской застройкой. Оценка комфорта проживания

и качества воздуха является глобальной целью ряда исследований авторов. Предыдущие работы в указанном регионе были сфокусированы преимущественно на анализе данных распространения выбросов от стационарных источников загрязнения, тогда как влияние городского микроклимата оставалось неизученным [1, 2]. Методология локальных климатических зон (Local Climate Zone/LCZ), разработанная Т. Оке и И. Стюартом, предлагает унифицированный подход к классификации структуры городской территории по комплексу параметров, включая морфологию застройки, характеристики подстилающей поверхности и тепловые свойства материалов [3–7].

В рамках глобальной задачи разработки системы мониторинга качества атмосферного воздуха и моделирования процессов переноса и рассеивания загрязняющих веществ запланировано проектирование экспериментальной сети метеомониторинга, схему размещения пунктов которой планируется получить на основе классификации городской территории по типам локальных климатических зон с оценкой потенциала использования объектов муниципальной инфраструктуры для их размещения. Получение распределения классов LCZ на территории города и сопоставительная оценка репрезентативности этих классов согласно пространственному положению потенциальных мониторинговых пунктов составляют цель настоящего исследования.

Практическая значимость работы заключается в разработке научно обоснованного подхода к планированию систем экологического мониторинга в городской среде, который в дальнейшем может быть применен не только для г. Новосибирска, но и для других городов со схожими характеристиками застройки и планировочной структуры, а при необходимости – адаптирован под города других регионов.

Материалы и методы

Исследование выполнялось для территории Ленинского района г. Новосибирска – крупного промышленного района с населением свыше 300 тыс. человек, характеризующегося сложной структурой застройки. Район включает зоны компактной многоэтажной и среднеэтажной застройки, промышленные территории, а также озелененные пространства, что делает его репрезентативным объектом для применения методологии локальных климатических зон.

Пространственное представление территории района согласно классификации LCZ было выполнено через LCZ-Generator [8]. Сервис является официальным инструментом глобального проекта WUDAPT и реализует стандартизированный протокол картографи-

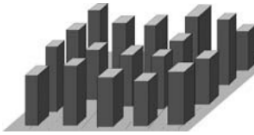
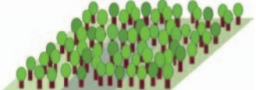
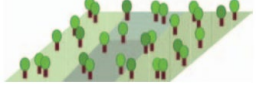
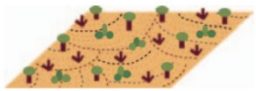
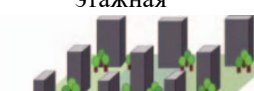
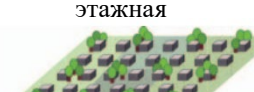
рования локальных климатических зон. Классификация LCZ в нём выполняется методом «случайного леса» (Random Forest). Выбор данного алгоритма осуществлён разработчиками сервиса и обусловлен тем, что он обеспечивает точность классификации без потери вычислительной эффективности при обработке 34 спектральных, радиолокационных и морфометрических признаков в облачной среде Google Earth Engine [8]. В отличие от нейросетей, которые требуют агрегирования пикселей и снижают пространственное разрешение итоговой карты, «случайный лес» работает как однопиксельный классификатор, что позволяет сохранить исходное высокое разрешение спутниковых снимков – критически важное условие для детального анализа неоднородной городской застройки. Все параметры алгоритма оставлены стандартными в строгом соответствии с протоколом сервиса, что обеспечивает методологическую преемственность, воспроизводимость и сопоставимость результатов с другими исследованиями, выполненными в рамках инициативы WUDAPT [9]. Входными данными для классификации служат композитный набор признаков, включающий временные ряды безоблачных изображений, спектральные индексы и поляризационные характеристики (табл. 1) [8].

Таблица 1. Используемые в LCZ-Generator данные дистанционного зондирования Земли

Сенсор	Канал/Индекс/Показатель
Landsat 8	– композиты на основе временных рядов безоблачных изображений каналов B2 (синий), B3 (зеленый), B4 (красный), B5 (ближний инфракрасный), B6/7 (коротковолновый инфракрасный 1/2), B10/11 (тепловой инфракрасный 1/2); – композиты индексных изображений BCI, NDBaI, EBBI, NDWI, NDBI, NDVI; – композиты процентилей P10 и P90 для NDVI
Sentinel 1	– данные одинарной поляризации (VV), перекрестной поляризации (VH) и двойной поляризации (VV/VH); – средние значения и стандартные отклонения (комбинации VV и VH); – индикатор VVH – это метрика, использующая двухполяризационные данные для оценки высоты зданий и городской структуры. Он использует комбинацию (VV) и (VH) обратного рассеяния для измерения объема и плотности городской застройки, обеспечивая высокую точность картирования городских территорий
Sentinel 2	– композиты на основе временных рядов безоблачных изображений каналов «красного края» (B5, B6, B7); – композиты индексных изображений NDVIre 1 и 2; – композиты индексных изображений S2REP, CSI и SEI
Прочие данные	– глобальная модель высоты лесного полога (Global Forest Canopy Height, [GFCH]); – цифровая модель рельефа (DTM), цифровая модель высот (DEM), цифровая модель поверхности (DSM)

Набор эталонов был сформирован при помощи инструментария «Google Earth» по описанию структуры классов LCZ (табл. 2) [4, 10].

Таблица 2. Сокращенные определения для локальных климатических зон

Тип застройки	Описание	Тип земного покрова	Описание
1. Компактная много- этажная 	Плотное скопление высотных зданий (более 9 этажей). Деревьев мало или совсем нет. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – бетон, сталь, камень и стекло	А. Густой лес 	Густо залесенный ландшафт с лиственными и/или вечнозелеными деревьями. Покров в основном проницаем (низкорослая растительность). Функционально это естественный лес, питомники или городской парк
2. Компактная средне- этажная 	Плотное скопление зданий средней этажности (3–9 этажей). Деревьев мало или совсем нет. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – камень, кирпич, плитка и бетон	В. Редколесье 	Слабо залесенный ландшафт с лиственными и/или вечнозелеными деревьями. Покров в основном проницаем (низкорослая растительность). Функционально это естественный лес, питомники или городской парк
3. Компактная мало- этажная 	Плотное скопление малоэтажных зданий (1–3 этажа). Деревьев мало или совсем нет. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – камень, кирпич, плитка и бетон	С. Кустарник, заросли кустарника 	Свободно произрастающие кустарники или низкорослые древесные породы. Покров в основном проницаем (обнаженная почва или песок). Функционально это естественные заросли кустарника или сельское хозяйство
4. Разреженная много- этажная 	Разреженное расположение высотных зданий (более 9 этажей). Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – бетон, сталь, камень, стекло	Д. Низкорослая растительность 	Однородный ландшафт из травянистых растений и сельскохозяйственных культур. Мало или нет деревьев и растений. Функционально это природные луга, сельское хозяйство или городской парк
5. Разреженная среднеэтажная 	Разреженное расположение зданий средней этажности (3–9 этажей). Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – камень, кирпич, бетон	Е. Скальные породы или асфальт 	Однородный ландшафт из скальных или асфальтированных покрытий. Мало или нет деревьев и растений. Функционально это природная пустыня (скальная) или городская транспортная инфраструктура
6. Разреженная мало- этажная 	Разреженное расположение малоэтажных зданий (1–3 этажа). Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – камень, кирпич, плитка и бетон	Ф. Обнажённая почва или песок 	Однородный ландшафт: почвенный или песчаный покров. Мало или нет деревьев и растений. Функционально это природная пустыня или сельское хозяйство
7. Лёгкая малоэтажная 	Плотное скопление одноэтажных зданий. Деревьев мало или совсем нет. Земельный покров в основном с твёрдым покрытием. Используются лёгкие строительные материалы (например, дерево, солома, гофрированный металл)	Г. Вода 	Большие открытые водоемы, такие как моря и озера, или небольшие водоемы, такие как реки, водохранилища и лагуны
8. Крупная малоэтажная 	Разреженное расположение крупных малоэтажных зданий (1–3 этажа). Мало или нет деревьев. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – сталь, бетон, металл и камень	ИЗМЕНЧИВЫЕ СВОЙСТВА ЗЕМНОГО ПОКРОВА Переменные или временные характеристики поверхностного покрова, которые значительно меняются под влиянием погодных условий, методов ведения сельского хозяйства и/или сезонных циклов.	

Окончание таблицы 1

9. Малонаселенная 	Редкое расположение небольших или средних зданий в природном окружении. Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – бетон, сталь, камень, стекло	b. Обнажённые кроны деревьев	Лиственные деревья без листьев (например, зимой). Увеличенный коэффициент обзора неба. Пониженное альbedo
10. Тяжёлая индустрия 	Малозэтажные и среднеэтажные промышленные сооружения (башни, резервуары, дымовые трубы). Деревьев мало или совсем нет. Земельный покров в основном асфальтированный или с твёрдым покрытием. Строительные материалы из металла, стали и бетона	c. Снежный покров	Толщина снежного покрова более 10 см. Низкая поверхностная проводимость тепла. Высокое альbedo
		d. Сухая почва	Пересохлая почва. Низкая поверхностная проводимость тепла. Большой коэффициент Боуэна. Повышенное альbedo
		w. Влажная почва	Переувлажнённая почва. Высокая поверхностная проводимость тепла. Малый коэффициент Боуэна. Пониженное альbedo

Для каждого класса LCZ было создано от 5 до 15 эталонов (рекомендации разработчиков сервиса), равномерно распределённых по территории города. Определение высоты зданий выполнялось с помощью инструмента «Street View» в «Google Earth». Верификация репрезентативности выборки проводилась путем визуального анализа спутниковых снимков высокого разрешения (рис. 1). При создании обучающего набора было выявлено, что на территории Ленинского района г. Новосибирска отсутствуют LCZ 7 и LCZ E. Точность классификации составила 71,4 % (рис. 2, 3).



Рис. 1. Примеры выделения эталонных объектов: слева – Разреженная малоэтажная (LCZ 6), справа – Редколесье (LCZ B)

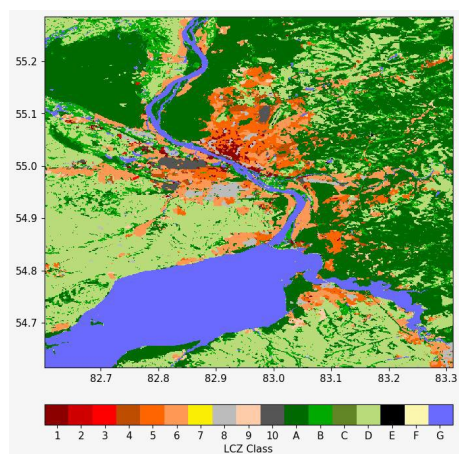


Рис. 2. Результат классификации

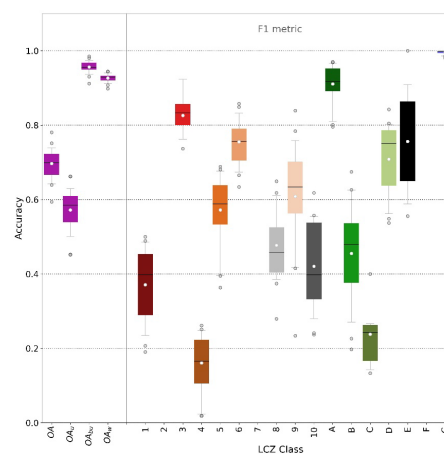


Рис. 3. Оценка точности классификации

Для оценки возможности размещения пунктов мониторинговой сети использовались данные о пространственном распределении объектов муниципальной инфраструктуры (детские сады и школы) Ленинского района города и спутниковые снимки сервиса Яндекс.Карты [11, 12]. Гипотетически пункты мониторинговой сети должны быть равномерно распределены по территории исследования. В качестве потенциальных сооружений-носителей измерительной аппаратуры предполагается выбрать муниципальные объекты, базируясь на логике их пространственного расположения, спроектированного на этапе создания градостроительных планов с учетом плотности застройки, расчетной численности населения. Также здания муниципальных объектов, предлагается выбрать по причине высокой вариабельности смежного окружения: как по наличию прилегающей застройки разной плотности и этажности, категориям загруженности соседствующих автодорог, так и по наличию «зеленого буфера» – древесной растительности (рис. 4, 5). Анализ проводился методом пространственного наложения карты LCZ и точечного слоя

муниципальных объектов с последующей экспертной оценкой репрезентативности пересечения различных типов городской среды с месторасположениями потенциальных мониторинговых постов.

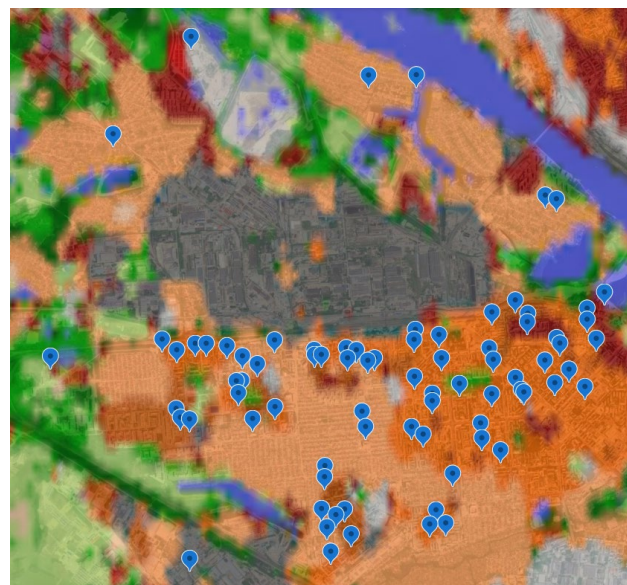


Рис. 4. Пространственное распределение зданий муниципальных объектов



Рис. 5. Примеры различной структуры застройки

Оценка потенциала размещения метеостанций показала, что в пределах определенных классификатором зон городской застройки LCZ 8–10 отсутствуют муниципальные объекты, однако смежные зоны содержат в себе объекты-кандидаты сети, находящиеся вблизи границ «слепых» зон LCZ, а значит, посредством интерполяции

можно обеспечить эти зоны расчетными значениями либо предусмотреть дополнительную установку N-станций для устранения «слепых» зон и повышения общей точности модельных расчетов пространственного распределения метеохарактеристик (рис. 6).



Рис. 6. LCZ без муниципальных объектов

Таким образом, примененный методический подход позволил не только провести классификацию городской территории по типам локальных климатических зон, но и оценить потенциал использования существующей муниципальной инфраструктуры для создания репрезентативной сети мониторинга атмосферного воздуха.

Результаты и обсуждение

В результате экспериментального исследования проведена классификация интересующей городской территории средствами LCZ-Generator и получена карта локальных климатических зон территории Ленинского района г. Новосибирска на основе набора 407 эталонных выборок. Карта демонстрирует выраженную пространственную неоднородность городской среды. Крупнейшими по площади жилыми типами LCZ в границах района оказались LCZ 4 (разреженная многоэтажная), LCZ 5 (разреженная среднеэтажная), LCZ 6 (разреженная малоэтажная) и LCZ 1 (компактная многоэтажная). Значительные площади заняты также зонами LCZ 8 (крупная малоэтажная) и LCZ 10 (тяжелая индустрия) (рис. 7).



Рис. 7. Отношение площади территории отдельных классов LCZ в границах Ленинского района г. Новосибирска

Важно отметить, что высокая общая точность классификации не гарантирует абсолютную достоверность получаемой карты. Это может быть связано с одним или несколькими из следующих факторов:

- оценка точности выполняется только для того пространства признаков, которое входит в набор обучающей выборки;
- классы полигонов обучающих выборок могут быть ошибочными из-за неправильной интерпретации ландшафта пользователем, например, из-за схожести между классами (такими как LCZ 3 и 7, А и В или 8, 10 и Е) или из-за использования непостоянных типов почвенно-растительного покрова;
- ошибки классификации LCZ зависят от количества классов, представленных обучающей выборкой: недостаточное разделение типов LCZ в обучающей выборке может привести к искусственно завышенному показателю общей точности классификации [8].

Проведенный анализ показал, что объекты муниципальной инфраструктуры (школы, детские сады, колледжи и вузы) распределены по территории района неравномерно, однако их пространственное расположение в целом повторяет распределение основных типов застройки. Муниципальные объекты-кандидаты располагаются только в классах LCZ 1, 3-6 (рис. 8, 9), поскольку отсутствие муниципальных объектов логично в растительных зонах и на территориях промышленных предприятий.

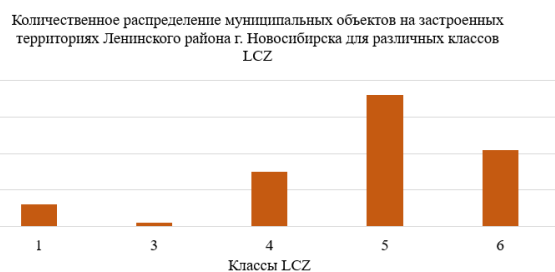


Рис. 8. Количественное распределение муниципальных объектов на застроенных территориях Ленинского района г. Новосибирска для различных классов LCZ



Рис. 9. Плотность распределения муниципальных объектов на застроенных территориях Ленинского района г. Новосибирска для различных классов LCZ

Это позволило идентифицировать для каждой выделенной локальной климатической зоны несколько потенциальных площадок для размещения мониторингового оборудования. Особую ценность представляют учреждения, расположенные в зонах перехода между различными типами LCZ, так как установка оборудования на них потенциально обеспечит возможность фиксировать динамику смены метеорологических параметров и концентраций загрязняющих веществ на границах зон разного типа.

Обсуждение полученных результатов указывает на несколько важных аспектов. Во-первых, предложенный принцип размещения станций сбора данных на базе муниципальных зданий позволяет достичь репрезентативного покрытия территории без необходимости строительства специализированных сооружений, что значительно снижает стоимость создания и эксплуатации мониторинговой сети. Во-вторых, расположение точек наблюдения в непосредственной близости от социально значимых объектов (школы, детские сады) повышает практическую ценность получаемых данных для оценки экологических рисков для здоровья особо уязвимых категорий населения – молодых поколений.

Важным результатом является также выявление «белых пятен» – зон с особыми микроклиматическими характеристиками (например, отдельные промышленные зоны или территории с уникальной морфологией застройки), для которых не удалось идентифицировать подходящие здания муниципальных объектов как будущих площадок для пунктов

сбора данных. Для этих территорий потребуется разработка индивидуальных решений по размещению оборудования.

Полученная карта LCZ и предварительный план размещения станций создают основу для перехода к следующему этапу проекта – разработке технических требований к измерительному оборудованию и его конструктивному исполнению. Особое внимание при этом должно быть уделено калибровке измерительных приборов, их защите от вандализма и удобству обслуживания.

Заключение и перспективы

Проведенное исследование положительно укрепило гипотезу эффективности методологии определения локальных климатических зон и использования данных о территориальном распределении муниципальных организаций для решения задач оптимизации пространственного размещения пунктов сети мониторинга атмосферного воздуха мегаполиса. Построенная карта LCZ Ленинского района г. Новосибирска наглядно демонстрирует высокую пространственную неоднородность городской среды, что обуславливает необходимость учета микроклиматических особенностей различных районов при планировании размещения пунктов системы измерений. Установлено, что использование зданий объектов муниципальной образовательной инфраструктуры в роли площадок для размещения измерительных станций позволит обеспечить репрезентативный охват всех ключевых типов городской среды.

Полученные результаты создают прочную основу для дальнейших исследований. В качестве непосредственной перспективы планируется публикация материалов исследования, посвященного выбору конкретного измерительного оборудования и разработке унифицированного конструктивного исполнения мониторинговых постов. Эта работа будет включать сравнительный анализ датчиков мониторинга атмосферного воздуха и метеопараметров, оценку их стоимости, точности, надежности и пригодности для длительной эксплуатации в городской среде [13–15].

С методической точки зрения, создание сети на основе разработанного плана открывает ряд новых возможностей. Прежде всего, сеть обеспечит сбор репрезентативного эмпирического массива данных о микроклиматических параметрах и концентрациях загрязняющих веществ в привязке к конкретным типам городской застройки. Эти данные станут основой для верификации и калибровки расчета моделей урбанизированного пограничного слоя атмосферы и моделей рассеивания загрязнений, что позволит перейти к созданию высокодетализированных полей загрязнения.

К долгосрочным теоретическим перспективам можно отнести проведение углубленных исследований механизмов формирования «острова тепла» в разрезе LCZ, изучение особенностей атмосферной циркуляции внутри урбанизированных каньонов разного типа, а также оценку эффективности различных градостроительных решений (озеленение, материалы с высоким альбедо) для улучшения микроклимата и качества воздуха [16, 17]. Реализация данного проекта мониторинговой сети может стать ключевым шагом в развитии комплексной системы экологического мониторинга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Прогнозирование ветровых условий для оценки концентраций загрязнений от стационарных источников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс, 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 4: Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск : СГУГиТ, 2025. С. 217–224. DOI 10.33764/2618-981X-2025-4-217-224.
2. Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Геопространственное моделирование при оценке территорий для жилого строительства. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 2. С. 135–143. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-135-143.
3. Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. Urban Climates. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 546 p. DOI 10.1017/9781139016476. URL: https://books.google.ru/books?id=7h0xDwAAQBAJ&redir_esc=y (дата обращения 15.09.2025).
4. Stewart I. D., Oke T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2012. – Vol. 93, No. 12. – P. 1879–1900. – DOI 10.1175/BAMS-D-11-00019.1. URL: https://www.researchgate.net/publication/258607564_Local_Climate_Zones_for_Urban_Temperature_Studies (дата обращения 15.09.2025).
5. Alexander P. J., Mills G. Local Climate Classification and Dublin’s Urban Heat Island. Atmosphere. 2014. Vol. 5, No. 4. P. 755–774. DOI 10.3390/atmos5040755. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/5/4/755> (дата обращения: 20.09.2025).
6. Stewart I. D. A Systematic Review and Scientific Critique of Methodology in Modern Urban Heat Island Literature. International Journal of Climatology. – 2011. – Vol. 31, No. 2. – P. 200–217. DOI 10.1002/joc.2141. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2141> (дата обращения: 25.09.2025).
7. Oke T. R. Towards Better Communication in Urban Climate. Theoretical and Applied Climatology. 2006. Vol. 84, No. 1–3. P. 179–190. DOI 10.1007/s00704-005-0143-2. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-005-0143-2> (дата обращения: 29.09.2025).
8. Demuzere M., Kittner J., Bechtel B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. Frontiers in Environmental Science 9:637455. [Электронный ресурс]. LCZ-Generator – URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455> (дата обращения 25.10.2025).
9. WUDAPT [Электронный ресурс]. World Urban Database and Access Portal Tools URL: <https://www.wudapt.org/> (дата обращения 25.10.2025).
10. Google Earth [Электронный ресурс]. Google Earth. URL: earth.google.com (дата обращения 25.10.2025).
11. Департамент образования Новосибирска [Электронный ресурс]. Мэрия города Новосибирска. URL: <https://do.nios.ru/> (дата обращения 05.11.2025).

12. Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. Яндекс URL: <https://yandex.ru/maps/65/novosibirsk/?ll=82.920430%2C55.030199&z=12> (дата обращения 05.11.2025).
13. Kelly K. E., Whitaker J., Petty A., Widmer C., Dybwad A., Sleeth D., Martin R., Butterfield A. Ambient and Laboratory Evaluation of a Low-Cost Particulate Matter Sensor. *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 221. P. 491-500. DOI 10.1016/j.envpol.2016.12.039. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28012666/> (дата обращения: 10.11.2025).
14. Nieckarz Z., Zoladz J. A. New Calibration System for Low-Cost Suspended Particulate Matter Sensors with Controlled Air Speed, Temperature and Humidity. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 17. Art. No. 5905. DOI 10.3390/s21175905. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8434339/> (дата обращения: 15.11.2025).
15. Wallace L., Bi J., Ott W., Sarnat J., Liu Y. Calibration of Low-Cost PurpleAir Outdoor Monitors Using an Improved Method of Calculating PM_{2.5}. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 256. Art. No. 118432. DOI 10.1016/j.atmosenv.2021.118432. URL: https://www.researchgate.net/publication/351315514_Calibration_of_low-cost_PurpleAir_outdoor_monitors_using_an_improved_method_of_calculating_PM25S135 (дата обращения: 18.11.2025).
16. Oke T. R. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982. Vol. 108, No. 455. P. 1–24. DOI 10.1002/qj.49710845502. URL: https://www.researchgate.net/publication/229724544_The_energetic_basis_of_urban_heat_island (дата обращения: 25.11.2025).
17. Grimmond C. S. B., Oke T. R. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form // *Journal of Applied Meteorology*. 1999. Vol. 38, No. 9. P. 1262–1292. DOI 10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2. URL: https://www.researchgate.net/publication/224001496_Aerodynamic_Properties_of_Urban_Areas_Derived_from_Analysis_of_Surface_Form (дата обращения: 27.11.2025).

REFERENCES

1. Chigrinov S. A., Kulik E. N. (2025). Forecasting of wind conditions to assess pollution concentrations from stationary sources. *Interesko Geo-Sibir" [Interexpo Geo-Siberia]*, 4(8), 214–224. DOI 10.33764/2618-981X-2025-4-217-224. [in Russian].
2. Chigrinov S. A., Kulik E. N. (2025). Geospatial modeling in the assessment of territories for residential construction *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30(2), 135–143. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-67-76 [in Russian].
3. Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, P. 546. DOI 10.1017/9781139016476. Retrieved from: https://books.google.ru/books?id=7h0xDwAAQBAJ&redir_esc=y (accessed September 15, 2025).
4. Stewart I. D., Oke T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, No. 12, P. 1879-1900. DOI 10.1175/BAMS-D-11-00019.1. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/258607564_Local_Climate_Zones_for_Urban_Temperature_Studies (accessed September 15, 2025).
5. Alexander P. J., Mills G. (2014). Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island. *Atmosphere*, 5 (4), P. 755–774. DOI 10.3390/atmos5040755. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/2073-4433/5/4/755> (accessed September 20, 2025).
6. Stewart I. D. (2011). A Systematic Review and Scientific Critique of Methodology in Modern Urban Heat Island Literature. *International Journal of Climatology*, 31 (2), P. 200–217. DOI 10.1002/joc.2141. Retrieved from: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2141> (accessed September 25, 2025).
7. Oke T. R. (2006). Towards Better Communication in Urban Climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1–3), P. 179–190. DOI 10.1007/s00704-005-0143-2. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-005-0143-2> (accessed September 29, 2025).

8. Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*. DOI i: 10.3389/fenvs.2021.637455. (accessed October 25, 2025).
9. WUDAPT (n.d.). World Urban Database and Access Portal Tools. Retrieved from: <https://www.wudapt.org/> (accessed October 25, 2025).
10. Google Earth. (n.d.). Retrieved from: earth.google.com (accessed October 25, 2025).
11. Novosibirsk Department of Education. (n.d.). Retrieved from: <https://do.nios.ru/> (accessed November 05, 2025).
12. Yandex.Maps. (n.d.). Retrieved from: <https://yandex.ru/maps/65/novosibirsk/?ll=82.920430%2C55.030199&z=12> (accessed November 05, 2025).
13. Kelly K. E., Whitaker J., Petty A., Widmer C., Dybwad A., Sleeth D., Martin R., Butterfield A. (2017). Ambient and Laboratory Evaluation of a Low-Cost Particulate Matter Sensor. *Environmental Pollution*, 221, P. 491–500. DOI 10.1016/j.envpol.2016.12.039. Retrieved from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28012666/> (accessed November 10, 2025).
14. Nieckarz Z., Zoladz J. A. (2021). New Calibration System for Low-Cost Suspended Particulate Matter Sensors with Controlled Air Speed, Temperature and Humidity. *Sensors*, 21 (17), Art. No. 5905. DOI 10.3390/s21175905. Retrieved from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8434339/> (accessed November 15, 2025).
15. Wallace L., Bi J., Ott W., Sarnat J., Liu Y. (2021). Calibration of Low-Cost PurpleAir Outdoor Monitors Using an Improved Method of Calculating PM_{2.5}. *Atmospheric Environment*, 256, Art. No. 118432. DOI 10.1016/j.atmosenv.2021.118432. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/351315514_Calibration_of_low-cost_PurpleAir_outdoor_monitors_using_an_improved_method_of_calculating_PM25S135 (accessed November 18, 2025).
16. Oke T. R. (1982). The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), P. 1–24. DOI 10.1002/qj.49710845502. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/229724544_The_energetic_basis_of_urban_heat_island (accessed November 25, 2025).
17. Grimmond C. S. B., Oke T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38 (9), P. 1262–1292. DOI 10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/224001496_Aerodynamic_Properties_of_Urban_Areas_Derived_from_Analysis_of_Surface_Form (accessed November 27, 2025).

Об авторах

Екатерина Николаевна Кулик – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Сергей Александрович Чигридов – аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Author details

Ekaterina N. Kulik – PhD, Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

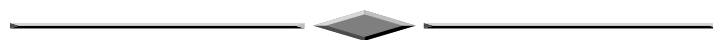
Sergey A. Chigridov – PhD Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Получено / Received 18.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.01.2026

Принята к публикации / Accepted 21.07.2026

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ



Научно-поисковая статья /Research article

УДК 004.6:556

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-119-127>

Методика создания геоинформационных баз данных для ведения государственного мониторинга водных объектов

Л. Н. Гилёва^{1✉}, О. Н. Долматова¹, Е. Д. Подрядчикова²

¹ Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, г. Омск, Российская Федерация

³ Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

e-mail: ln.giljova@omgau.org

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, связанные с формированием геоинформационных баз данных с применением ГИС-систем открытого доступа для обеспечения цифровым картографическим материалом мониторинговых работ водных объектов. Авторами проанализированы природно-климатические условия, земле- и природопользование территории Бодайбинского района Иркутской области, обоснована необходимость проведения государственного мониторинга водных объектов (ГМВО). Предложено методическое описание работ по созданию геоинформационных баз данных для ведения ГМВО и представлены результаты апробации. В заключении даны рекомендации по ведению ГМВО с применением геоинформационных систем и технологий на территории муниципального образования.

Ключевые слова: государственный мониторинг водных объектов, водные ресурсы, ГИС-системы открытого доступа, неустановленные береговые линии, границы поселений

Для цитирования:

Гилёва Л. Н., Долматова О. Н., Подрядчикова Е. Д. Методика создания геоинформационных баз данных для ведения государственного мониторинга водных объектов. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 119–127. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-119-127>

A methodology for developing geospatial databases to support state monitoring of water bodies

L. N. Gileva^{1✉}, O. N. Dolmatova¹, E. D. Podryadchikova²

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

² Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

e-mail: ln.giljova@omgau.org

Abstract. The study presents the results of research aimed at developing a geospatial database based on open-source geographic information system technologies to support digital cartographic provision

for the monitoring of water bodies. The natural and climatic conditions, land-use patterns, and environmental management practices of the Bodaibinsky district in Irkutsk region were comprehensively analyzed to substantiate the need for implementing the State Monitoring of Water Bodies (SMWB) at the municipal level. A methodological framework for designing and implementing geospatial databases tailored to the requirements of SMWB is proposed and validated through a practical case study. Based on the results, recommendations are developed for organizing municipal-level water-body monitoring using GIS technologies.

Keywords: state monitoring of hydrographic objects, water resources, open access geographic information systems, unestablished shorelines, boundary of settlement

For citation:

Gileva L. N., Dolmatova O. N., Podryadchikova E. D. (2026). A methodology for developing geospatial databases to support state monitoring of water bodies. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 119–127. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-119-127>

Введение

Государственный мониторинг водных объектов (ГМВО) представляет собой комплексную систему, включающую наблюдения, оценку и прогнозирование состояния водных ресурсов [1]. ГМВО включает в себя регулярные исследования состояния водных объектов, а также количественные и качественные показатели водных ресурсов, контроль за режимом использования водоохранных зон и территорий, подверженных затоплениям и подтоплениям [2]. В процессе работы ГМВО осуществляются сбор, обработка и хранение данных, полученных в ходе наблюдений, а также внесение этих данных в государственный водный реестр [3]. Кроме того, производятся оценка и прогнозирование изменений как состояния водных объектов, так и показателей качества и количества водных ресурсов. ГМВО включает в себя несколько направлений: 1) мониторинг поверхностных вод; 2) наблюдение за состоянием дна, берегов водоемов и водоохранных зон; 3) мониторинг подземных вод; 4) наблюдение за водохозяйственными системами (Водный кодекс Российской Федерации: федеральный закон от 30.06.2006 № 74-ФЗ. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный). Порядок осуществления ГМВО установлен Постановлением Правительства РФ (Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов: Постановление Правительства РФ от 10.04.2007 № 219 – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный), в развитие

которого Приказом Минприроды России утверждены Методические указания (Об утверждении Методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части наблюдений за состоянием дна, берегов, состоянием и режимом использования водоохранных зон и изменениями морфометрических особенностей водных объектов и их частей : Приказ Минприроды России от 08.10.2014 № – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный). Мониторинг водных объектов с использованием дистанционных методов представляет собой важный аспект современного управления водными ресурсами и охраны окружающей среды [4].

Ведение ГМВО в существующем виде по средствам АИС ГМВО затруднено рядом проблем, которые отмечают ученые-практики: 1) несоответствие между объёмом выполненных наблюдений и их значениями, внесенными в таблицы [5]; 2) трудности в идентификации водных объектов на местности, что усложняет или делает невозможным анализ полученных результатов [6]; 3) как отмечено в статье [7], отсутствие стандартизации и единых процедур приема и проверки данных от разных заказчиков, что приводит к неоднородности форматов и полноты данных АИС ГМВО.

Следовательно, можно сделать вывод, что для осуществления ГМВО необходима геоинформационная база данных, включающая векторные слои с атрибутивными таблицами [8].

Создание векторного слоя гидрографической сети может выполняться на основе обновления векторных данных открытого до-

ступа, данных дистанционного зондирования Земли, топографических карт и планов для исследуемой территории с указанием в атрибутивной таблице следующих данных:

- наименование, тип, код водного объекта, местоположение, длина или площадь акватории, площадь водосбора по данным государственного водного реестра (ГВР);

- название и тип водного объекта по данным государственного каталога географических названий (ГКГН);

- актуализированные данные о протяженности водотока, береговой линии и водоема, рассчитанные на основе топографических карт, космических снимков доступа;

- масштаб источника картографических данных, использованных для определения протяженности водного объекта картометрическим способом;

- протяженность водного объекта с учетом коэффициента извилистости [9].

Постановлением Правительства РФ от 10.04.2007 № 219 не предусмотрен порядок подготовки картографического материала для ведения ГМВО, что отмечено также в ряде научных статей [10, 11]. Регулирование использования территории на уровне муниципальных образований со стороны органов власти занимает важное место в системе земельно-имущественных отношений [12, 13]. При этом информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов, включая аспекты государственного надзора и контроля, выступает одной из ключевых целей ГМВО [14]. Таким образом, возникает необходимость проведения картографических работ по формированию цифровых баз данных, выполненных с применением геоинформационных технологий в рамках свободно распространяемых ГИС-продуктов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются населенные пункты Бодайбинского района Иркутской области, расположенные в северо-восточной части Витимо-Патомского нагорья на территории, приравненной к районам Крайнего Севера. Гидрография района пред-

ставлена значительной сетью рек и озер. Территория объекта исследования подвержена паводкам, затоплениям и подтоплениям, происходящим в границах населенных пунктов. Подобные природные явления наносят огромный ущерб человеку, природе и экономике.

Наиболее крупные реки, протекающие по территории района, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики рек

Наименование водного объекта	Длина водотока общая, км	Наименование водного объекта	Длина водотока общая, км
р. Витим	1978	р. Муода	167
р. Чара	851	р. Большая Таймендра	163
р. Большой Патом	570	р. Хомолхо	143
р. Жуя	337	р. Тампер	140
р. Молбо	334	р. Тонода	126
р. Челончен	332	р. Бодайбо	120
р. Нечера	265	р. Сигикта	111
р. Мамакан	209	р. Вача	76
р. Ченча	205	р. Джюкте	70
р. Малый Патом	191	р. Кутакан	63

Общая протяженность водотока составляет 6 451 км. Площадь водной поверхности озер составляет от 5,5 до 50 км². Озеро Орон внесено ЮНЕСКО в перечень изучаемых горных озер Евразии [15].

Ведение ГМВО актуально для исследуемой территории из-за частых паводков, затоплений и подтоплений, происходящих в границах населенных пунктов, что негативно отражается на жизнедеятельности населения.

Формирование баз данных для ведения ГМВО с применением геоинформационных систем и технологий предусматривает применение ГИС-системы открытого доступа: SAS.Планета, MapInfo Pro 15.0, QGIS, Nakarte.me [16].

Nakarte.me – это полностью бесплатный онлайн ресурс, позволяющий работать с картами на мобильном устройстве, которое имеет подключение к интернету. С помощью онлайн ресурса Nakarte.me можно получить различные карты, спутниковые снимки от разных источников, треки и метки, панорамные фото с геопривязкой и многое другое.

Исследование в отношении объекта проводилось с применением картографического метода, метода геоинформационного анализа, статистического и аналитического методов.

Методику создания геоинформационных баз данных для ведения ГМВО с применением геоинформационных систем можно представить в виде схемы (рис. 1).

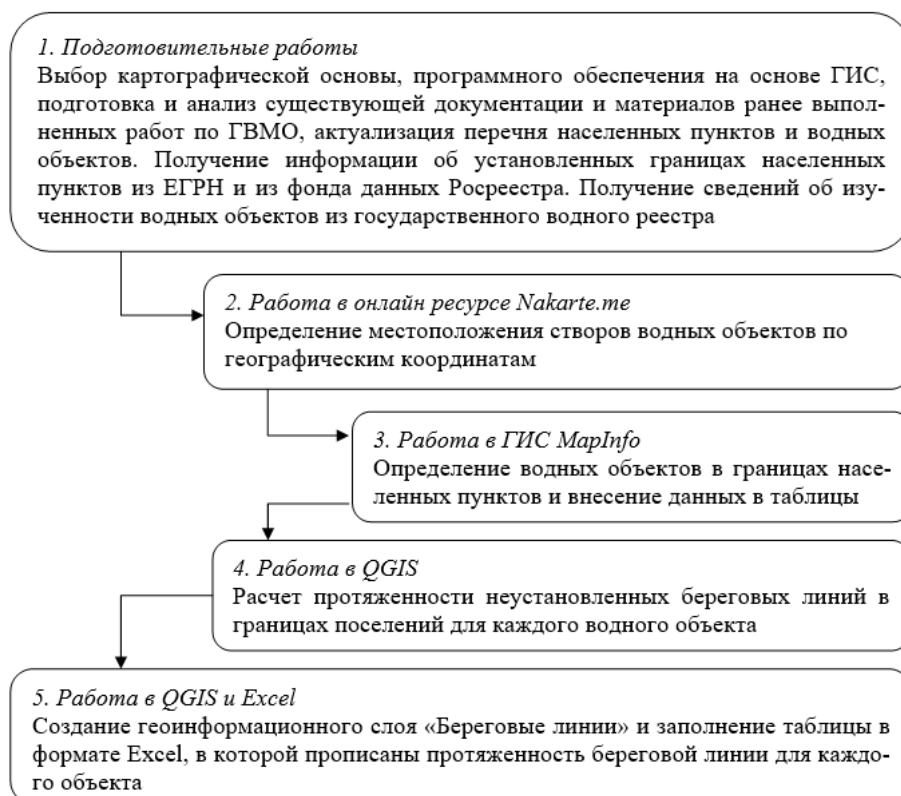


Рис. 1. Методика создания геоинформационных баз данных для ведения ГМВО

Созданный геоинформационный слой «Береговые линии» может интегрировать со сведениями ГВР и ЕГРН об установленных границах водных объектов, водоохранных зон, прибрежных защитных полос, защитных зонах, зонах особого режима использования, что обеспечит значительную наполняемость сведений.

Результаты и их обсуждение

В результате работ в отношении объекта исследования применена методика разработки векторного слоя гидрографической сети с применением геоинформационных систем открытого доступа на основе топографических карт масштабов 1 : 200 000, 1 : 100 000 для территории Иркутской области и более крупных масштабов – в границах населенных пунктов с указанием в атрибутивной таблице.

На I этапе «Подготовительные работы» принимается решение администрацией Ир-

кутской области по подготовке геоинформационных баз данных береговых линий для каждого водного объекта в границах населенных пунктов в разрезе муниципальных районов для дальнейшего проведения ГМВО Министерством природных ресурсов и экологии Иркутской области, выполняется подготовка технического задания на выполнение работ, проводится анализ существующей документации и материалов по ранее проведенным исследованиям и мониторингам водных объектов, анализ существующих данных о водных объектах, включая их состояние и характеристики. Вносится информация о населенных пунктах в таблицу в формате Excel: код ОКТМО, вид населенного пункта, наименование населенного пункта, численность населения на 01.01.2023 г.

Результат подготовительного этапа представлен в табл. 2.

Фрагмент таблицы в формате Excel, в которой прописана протяженность береговых линий для каждого водного объекта в границах населенных пунктов Бодайбинского района, представлен в табл. 3.

Таблица 3. Протяженность береговых линий для каждого водного объекта в границах населенных пунктов Бодайбинского района

№ п/п	Наименование поселения	Наименование водного объекта	Количество жителей, проживающих на территории Иркутской области, подверженной негативному воздействию вод, чел	Протяженность береговой линии водных объектов в границах поселений, расположенных на территории Иркутской области, км
1.	Витимское ГП	р. Витим	392	8,8
		р. Колотовка		0,6
		р. Малая Северная		1,1
		р. Бол.Северная		0,5
		р. Еремиха		0,6
		р. без названия		0,7
2.	Луговское ГП	р. Мама	402	4,8
		р. Мал.Слюдянка		0,6
		р. Луговка		0,9
		р. без названия		0,3
3.	Мамское ГП	р. Витим	2556	4,7
		р. Мама		2,9
		р. Черная		0,5
		р. без названия		5,1

Количество жителей, проживающих на территории Витимского, Луговского и Мамского городских поселений Иркутской области, подверженной негативному воздействию водных объектов, внесено на основании сведений о численности населения по состоянию на 01.01.2020 г. Протяженность береговых линий рассчитывается по координатам автоматически в программе QGIS.

Созданная база геоинформационных данных, в которую внесены участки, подверженные подтоплению, затоплению, подмывам берегов рек, позволит проводить последующие регулярные мониторинговые наблюдения за изменением состояния береговых линий в границах каждого поселения Бодайбинского района в разрезе каждого отдельного населенного пункта, результаты которых будут сравниваться с созданной базой и приниматься решения по прогнозированию, оценке, минимизации негативных процессов в водоохранных зонах, прибрежных защитных полосах, защитных зонах, зонах особого режима использования.

Заключение

Ведение ГМВО с применением геоинформационных систем и технологий, созданные

базы данных водных объектов в виде геоинформационного слоя «береговые линии» на территории муниципального образования позволит проводить дальнейшие исследования и наблюдения с учетом установленных видов и типов водных объектов и установленных береговых линий, находящихся в границах населенных пунктов.

В основу ведения ГМВО положены разработанные с применением ГИС-систем электронные базы данных векторных информационных слоев, при наложении которых возможно и необходимо формирование электронных цифровых карт-схем, включая мониторинг зон затопления и подтопления, обследование дна и берегов водных объектов с указанием русловых процессов и деформаций в русловой зоне, а также выделение наиболее опасных участков.

Апробация представленной методики выполнена в отношении населенных пунктов Бодайбинского муниципального района Иркутской области, где проведены работы по созданию геоинформационной базы береговых линий с применением ГИС-систем и технологий открытого доступа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонова И. О., Кручинина Н. Е. Экологический мониторинг водных объектов: учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 202 с.
2. Вуглинский В. С., Высоцкий Д. В., Яковлева Т. И. Мониторинг поверхностных водных объектов в России. Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 77–88. DOI 10.52002/0130-2906-2021-6-77-88.
3. Стрельченко О. В., Полин А. А. О службе государственного мониторинга водных биоресурсов и среды их обитания. Водные биоресурсы и среда обитания. 2020. Т. 3, № 1. С. 114–120. DOI 10.47921/2619-1024_2020_3_1_114.
4. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Павлов Н. С. [и др.]. Мониторинг водных объектов дистанционными методами. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 2. С. 67–75. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
5. Школьный Д. И., Завадский А. С. Мониторинг берегов рек в рамках государственного мониторинга водных объектов: современное состояние и перспективы развития. Водное хозяйство России. 2021. № 2. С. 22–39. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-2.
6. Школьная, Ю. Г., Ершов А. В. Мониторинг водных объектов с использованием ГИС-технологий на примере озера Камыстыбас. Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2022. № 3. С. 225–230. DOI 10.33764/2687-041X-2022-3-225-230.
7. Железняк Н. М. К вопросу применения геоинформационных систем как формы развития государственного водного реестра (на примере модели реки Мзымта). Водное хозяйство России. 2019. № 1. С. 52–59. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-4.
8. Магдиев Х. Н., Ширинбоев Д. Н. Опыт картографирования характеристик поверхностных водных объектов ученных зарубежных стран с целью их мониторинга. Экономика и социум. 2023. № 9(112). С. 494–503.
9. Ходяшев М. Б., Киселева Н. П., Варюхина С. А. К вопросу совершенствования системы экологического мониторинга поверхностных водных объектов. Уральский научный вестник. 2023. Т. 8, № 4. С. 26–42.
10. Носаль А. П., Кузьмина А. А., Топоркова А. А. Гидроморфологический мониторинг водных объектов и их водоохранных зон: проблемы и перспективы. Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II межд. конф. : сб. материалов (Казань, 3–7 февраля 2019 г.). Казань : Академия наук Республики Татарстан, 2019. С. 308–313.
11. Афонина Т. Е., Пономаренко Е. А. Мониторинг и кадастр природных ресурсов : учебное пособие. Иркутск : ИрГСХА, 2014. 213 с.
12. Жук В. Н., Варламов Е. Н. Зарубежный опыт ведения мониторинга поверхностных вод. Экология и промышленность. 2019. № 2(59). С. 113–119. DOI 10.35477/2311-584X.59.113-119.
13. Дубровский А. В., Скоринская Е. А. Методическое и технологическое обеспечение оценки достоверности судебных экспертиз по определению границ водных объектов. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 5. С. 125–139. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-125-139.
14. Гилева Л. Н. Мониторинг земель как информационная основа управления использованием земельных ресурсов и объектов недвижимости : учебное пособие. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. 128 с.
15. Схема территориального планирования Бодайбинского муниципального района. [Электронный ресурс]. https://bodaybo38.ru/page/bodaybo38_rubrics-73.
16. Гафуров А. М., Усманов Б. М. Основы работы в QGIS. Часть 1. Казань : Казанский университет, 2022. 30 с.

REFERENCES

1. Tikhonova, I. O. & Kruchinina N. E. (2023). *Ekologicheskij monitoring vodnyh ob"ektov [Ecological monitoring of hydrographic objects]*. Moscow: INFRA-M, 202 p. [in Russian].
2. Vuglinsky, V. S., Vysotsky D. V., Yakovleva T. I. (2021) Monitoring of surface hydrographic objects in Russia. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*, 6, 77-88. DOI 10.52002/0130-2906-2021-6-77-88 [in Russian].
3. Strelchenko, O. V. & Polin A. A. (2020) On the service of state monitoring of aquatic biore-sources and their habitat. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic bioresources and habitat]*, 3(1), 114-120. DOI 10.47921/2619-1024_2020_3_1_114 [in Russian].
4. Mustafin M. G., Valkov V. A., Pavlov N. S. & [et al.] (2023) Monitoring of hydrographic ob-jects by remote methods. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]* 2 (28), 67-75. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75 [in Russian].
5. Shkolny, D. I. & Zavadsky A. S. (2021) Monitoring of River Banks as Part of State Monitoring of Water Objects: Current State and Development Prospects. *Vodnoe hozyajstvo Rossii [Water Man-agement in Russia]*. 2, 22-39. – DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-2 [in Russian].
6. Shkolnaya, Yu. G. & Ershov A. V. (2022) Monitoring of hydrographic objects using GIS tech-nologies on the example of Lake Kamystybas. *Regulirovanie zemel'no-imushchestvennyh otnoshenij v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, ocenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnolog-icheskie resheniya [Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions]*. 3, 225-230. – DOI 10.33764/2687-041X-2022-3-225-230 [in Russian].
7. Zheleznyak N. M. (2019) On the Application of Geoinformation Systems as a Form of Devel-opment of the State Water Register (Based on the Model of the Mzymta River) *Vodnoe hozyajstvo Rossii [Water Management in Russia]* – 2019. – No. 1. – 52-59. – DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-4.
8. Magdiev, H. N. & Shirinboev D. N. (2023) The experience of mapping the characteristics of surface hydrographic objects of scientists from foreign countries in order to monitor them. *Ekonomika i socium [Economics and society]*, 9(112), 494-503 [in Russian].
9. Khodyashev, M. B. Kiseleva N. P. & Varyukhina S. A. (2023) On the issue of improving the system of environmental monitoring of surface hydrographic objects. *Ural'skij nauchnyj vestnik [Ural Scientific Bulletin]* 4(8), 26-42 [in Russian].
10. Nosal, A. P. & Kuzmina A. A. & Toporkova A. A. (2019) Hydro-morphological monitoring of water bodies and their water protection zones: problems and prospects. In *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnometodicheskoy konferentsii: Oзера Evrazii: problemy i puti ikh resheniya [Proceedings of International Scientific and Practical Conference: Lakes of Eurasia: Problems and Solutions]* (pp. 308-313) Kazan: Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan Publ. [in Russian].
11. Afonina T.E. & Ponomarenko E. A. (2014) *Monitoring i kadastr prirodnih resursov [Moni-toring and cadastre of natural resources]* Irkutsk: IrGSHA, 213 p. [in Russian].
12. Zhuk, V. N. & Varlamov E. N. (2019) Foreign experience in monitoring surface waters. *Ekologiya i promyshlennost' [Ecology and industry]* 2(59), 113-119. – DOI 10.35477/2311-584X.59.113-119 [in Russian].
13. Dubrovsky, A. V. & Skorinskaya E. A. (2023) Methodological and technological support for assessing the reliability of forensic examinations to determine the boundaries of hydrographic objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 5(28), 125-139. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-125-139 [in Russian].
14. Gileva, L. N. (2018) *Monitoring zemel' kak informacionnaya osnova upravleniya ispol'zovaniem zemel'nyh resursov i ob"ektov nedvizhimosti [Land monitoring as an information ba-sis for managing the use of land resources and real estate]* Tyumen: Tyumen Industrial University, 128 p. [in Russian].

15. Spatial planning scheme for the Bodaibinsky municipal district Retrieved from https://bodaybo38.ru/page/bodaybo38_rubrics-73 [in Russian]

16. Gafurov A. M. & Usmanov B. M. (2022). *Osnovy raboty v QGIS. Part 1* [Basics of working in QGIS. Part 1]. Kazan: Kazan University, 30 p. [in Russian].

Об авторах

Лариса Николаевна Гилёва – кандидат географических наук, заведующая кафедрой землеустройства.

Ольга Николаевна Долматова – кандидат экономических наук, декан землеустроительного факультета.

Екатерина Дмитриевна Подрядчикова – кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Author details

Larisa N. Gileva – PhD, Head of the Department of Land Management.

Olga N. Dolmatova – PhD, Dean of the Faculty of Land Management.

Ekaterina D. Podryadchikova – PhD, Associate Professor of the Department of Geodesy and Cadastral Activity.

Получено / Received 15.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 13.11.2025

Принята к публикации / Accepted 16.06.2026

Научно-практическая статья/Research article

УДК 332.6:631.4

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-128-136>

**Оценочное зонирование земель ООПТ на основе характеристик почв
для повышения точности кадастровой стоимости**

А. К. Кошель¹✉, А. М. Лелюхина¹

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

e-mail: koshelanastacia@gmail.com

Аннотация. Эффективное управление особо охраняемыми природными территориями (далее – ООПТ) требует применения научно обоснованных методов оценочного зонирования, учитывающих особенности почвенного покрова как ключевого компонента экосистем. В данной работе представлена комплексная методика оценочного зонирования земель ООПТ, основанная на анализе морфологических, физико-химических и экологических свойств почв с использованием геоинформационных технологий. Разработанная система критериев и шкал позволяет объективно ранжировать территории по степени природоохранной значимости и функциональной нагрузке, что обеспечивает принятие обоснованных управленческих решений по сохранению и рациональному использованию природных ресурсов. Методика апробирована на примере ООПТ регионального значения «Анапская пересыпь», «Маркотх», орнитологического парка в Имеретинской низменности, где проведён сравнительный анализ традиционного и предлагаемого подходов к кадастровой оценке.

Ключевые слова: кадастровая оценка, особо охраняемые природные территории, почвенное зонирование, тематические карты, пространственный анализ, почвенный покров, экологическая ценность, геоинформационные технологии

Для цитирования:

Кошель А. К., Лелюхина А. М. Оценочное зонирование земель ООПТ на основе характеристик почв для повышения точности кадастровой стоимости. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 128–136. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-128-136>

**Evaluative zoning of specially protected natural area lands based on soil
characteristics for improved cadastral valuation**

А. К. Koshel¹✉, А. М. Lelyukhina¹

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

e-mail: koshelanastacia@gmail.com

Abstract. The effective management of specially protected natural areas (SPNA) requires scientifically grounded approaches to evaluative zoning that account for soil cover as a key component of the ecosystem. The study proposes an integrated methodology for the evaluative zoning of SPNA lands based on multivariate analysis of morphological, physicochemical, and ecological soil properties using geographic information systems. The framework establishes a hierarchical set of criteria and scaling indicators that enable the objective differentiation of territories according to their conservation value and allowable functional load. This approach supports evidence-based decision-making for the protection and sustainable use of natural resources. To validate the proposed methodology, a comparative analysis was conducted between conventional cadastral valuation approaches and the devel-

oped integrative model. The assessment was performed within regional-level SPNA, including "Anapa Spit", "Markotkh", and the Imereti Lowland Ornithological Park.

Keywords: cadastral valuation, specially protected natural areas, soil zoning, thematic maps, spatial analysis, soil cover, conservation significance, geoinformation technologies

For citation:

Koshel A. K., Lelyukhina A. M. (2026). Evaluative zoning of specially protected natural area lands based on soil characteristics for improved cadastral valuation. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 128–136. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-128-136>

Введение

Кадастровая оценка земель ООПТ является одной из наиболее сложных задач современной оценочной практики. Традиционные методики, основанные на укрупнённых кадастровых зонах и не учитывающие природные особенности, не обеспечивают необходимой точности, что приводит к искажению налогообложения и снижает эффективность управления земельными ресурсами [1].

ООПТ – это уникальные природные комплексы, критически важные для сохранения биологического разнообразия и поддержания экологического баланса регионов [2].

Одним из ключевых компонентов экосистем ООПТ является почвенный покров, определяющий продуктивность, устойчивость и способность территорий к самовосстановлению. Поэтому особенности почв должны учитываться при зонировании земель ООПТ [3].

В настоящем исследовании оценочное зонирование рассматривается как дифференциация территории ООПТ по типам почв с учётом их вклада в кадастровую стоимость. Методика включает сбор и анализ почвенной информации, выбор значимых критериев, создание тематических карт и проведение расчетов. Такой подход позволяет объективно учесть почвенные факторы как ключевые для стоимостной оценки земель.

Разрабатываемая методика оценочного зонирования базируется на унифицированной системе критериев и шкал, что обеспечивает её применимость к различным типам ООПТ. В рамках исследования она была апробирована на трёх ООПТ Краснодарского края: прибрежном парке «Анапская пересыпь», комплексном ландшафтном природном парке

«Маркотх», расположенном на северных и южных склонах Главного Кавказского хребта, и природном орнитологическом парке в Имеретинской низменности, включающем мозаичный комплекс озёр, заболоченных каналов и луговых экосистем. В настоящей статье детально рассматриваются результаты для «Анапской пересыпи», тогда как два других объекта использованы для проверки переносимости критериев и устойчивости системы весовых коэффициентов в контрастных природных условиях.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методики кадастровой оценки земель ООПТ регионального значения с учетом почвенных различий. Игнорирование этих факторов при кадастровой оценке приводит к ошибкам, снижающим эффективность налоговой системы и финансирования природоохранных мероприятий. Занижение кадастровой стоимости участков с высокой природоохранной ценностью приводит к недополучению бюджетных доходов и ограничивает финансирование природоохранных мероприятий, тогда как завышение стоимости деградированных территорий искажает налоговую нагрузку и не стимулирует их восстановление. Кроме того, отсутствует научно обоснованная система критериев зонирования на основе почвенных характеристик [4]. Критика традиционных подходов базируется на положениях Федерального закона № 237-ФЗ «О государственной кадастровой оценке» и методических указаний по государственной кадастровой оценке, согласно которым для земель ООПТ ключевым ценообразующими факторами выступают вид использования, физические характеристики и экологическое состояние участков. Предлагаемая методика уточняет эти

факторы через систему почвенных критериев, обеспечивая более детализированное отражение природоохранной ценности.

Цель исследования – разработка научно обоснованной методики оценочного зонирования земель ООПТ на основе комплексного учёта характеристик почвенного покрова с применением современных геоинформационных технологий.

Методика базируется на принципах системности, иерархичности, многофакторности и адаптивности. Использование количественных методов обеспечивает объективность оценки, требуемая плотность точек гарантирует репрезентативность, а практическая применимость достигается возможностью реализации в условиях ограниченных ресурсов.

Основные группы критериев оценочного зонирования включают морфологические характеристики (строение почвенного профиля, мощность горизонтов, окраска, структура, новообразования), физико-химические показатели (механический состав, плотность, пористость, водопроницаемость, реакция среды, содержание гумуса, степень засоления, катионный обмен), экологические параметры (биологическая и ферментативная активность, содержание микроэлементов и загрязняющих веществ, эродированность, подверженность деградационным процессам), а также ландшафтно-экологические признаки, отражающие положение почв в природных комплексах, их влажностный режим, дренированность, особенности микроклимата и тип растительности [5].

Материалы и методы

Развитие экосистемного и почвенно-ориентированного подходов к оценке земель находит отражение в работах по экологическому зонированию и учёту функций почв. Международная практика интеграции почвенных и ландшафтных характеристик в кадастровую и планировочную оценку территорий представлена, в частности, в проекте CORINE Land Cover [6].

Исследование опирается на следующие нормативные акты: федеральный закон (закон Российской Федерации «О государствен-

ной кадастровой оценке» от 03.07.2016 № 237-ФЗ // Российская газета. – 2016 г. – № 146. – с изм. и допол. в ред. от 28.12.2025), приказ (приказ Росреестра «Об утверждении методических указаний о государственной кадастровой оценке» от 04.08.2021 № П/0336 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2021 г. – с изм. и допол. в ред. от 15.09.2025), федеральный закон (Закон Российской Федерации «Об особо охраняемых природных территориях» от 15.02.1995 № 33-ФЗ // Российская газета. – 1995 г. – с изм. и допол. в ред. от 29.12.2025), закон (закон Краснодарского края «Об особо охраняемых природных территориях Краснодарского края» от 22.12.2003 № 656-КЗ // Кубанские новости. – 2005 г. – № 47. – с изм. и допол. в ред. от 02.12.2025), ГОСТ («ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериального, гельминтологического анализа» от 01.01.2019 № 17.4.4.02-2017 с изм. и допол. в ред. от 01.01.2026), ГОСТ («ГОСТ 26423–85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки» от 01.01.1986 № 126423–85 с изм. и допол. в ред. от 06.04.2015), ГОСТ («ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава» от 01.07.2015 № 126423–85 с изм. и допол. в ред. от 01.01.2021).

Формирование системы оценочных критериев и весовых коэффициентов осуществлялось в соответствии с положениями Федерального закона № 237-ФЗ и Методологических указаний по государственной кадастровой оценке, в которых в качестве ключевых ценообразующих факторов для земель особо охраняемых территорий выделяются вид и интенсивность использования, физические характеристики участков и их экологическое состояние. В предлагаемой методике морфогенетические и физико-химические показатели почв интерпретируются как компоненты блока «физические характеристики», тогда как экологические и природоохранные показатели конкретизируют фактор «экологическое состояние», что обеспечивает методиче-

скую преемственность и правовую корректность включения почвенных характеристик в модель кадастровой оценки [7].

Расчёт корректирующих коэффициентов реализуется в рамках действующих программных комплексов государственной кадастровой оценки за счёт включения дополнительного блока входных данных о почвенном покрове без изменения базовой структуры модели и перечня ценообразующих факторов.

Объектами апробации методики выступили три ООПТ регионального значения, различающиеся по природным условиям и структуре почвенного покрова. Апробация методики проведена на трёх ООПТ Краснодарского края различной природноклиматической зоны: природный парк «Анапская пересыпь» (32,9 тыс. га, прибрежный ландшафт) [8], природный парк «Маркотх» (65,6 тыс. га, горно-лесной ландшафт) [9], природный орнитологический парк в Имеретинской низменности (0,3 тыс. га, водно-болотный комплекс) [10].

Для оценочного зонирования земель ООПТ применяются методы полевых, лабораторных и камеральных исследований. На начальном этапе маршрутные обследования позволяют получить информацию о структуре почвенного покрова и его пространственном распределении [11,12].

Особое внимание уделяется показателям, характеризующим экологическое состояние: содержанию тяжёлых металлов, остаточных пестицидов, радионуклидов [13].

Камеральная обработка включает анализ и систематизацию данных с использованием статистических методов. Валидация результатов осуществляется путём сопоставления с независимыми исследованиями и экспертными оценками.

Интеграция данных дистанционного зондирования с результатами наземных исследований позволяет эффективно картографировать почвенный покров даже на обширных и труднодоступных территориях [14].

Зонирование включало пять этапов: подготовительный (сбор информации и анализ правового статуса), полевой (маршрутные обследования и отбор проб), лабораторный (аналитические исследования), камеральный

(многофакторный анализ и выделение однородных зон), заключительный (валидация и подготовка отчётности).

Ключевым компонентом методики является система балльной оценки, для каждого критерия разрабатывается шкала, отражающая специфику почвенного покрова и природно-климатические условия территории.

Результаты

Ключевым компонентом методики является десятибалльная система оценки, разработанная в соответствии с положениями Федерального закона № 237-ФЗ (табл. 1).

Таблица 1. Система оценочных критериев почвенного покрова ООПТ

Группа критериев	Показатели	Весовой коэффициент
Морфогенетические	Тип почв	0,25
	Степень развития профиля	0,20
	Мощность гумусового горизонта	0,15
	Характер гумусонакопления	0,10
Физико-химические	Содержание органического вещества	0,20
	Кислотно-основные условия	0,15
	Обеспеченность элементами питания	0,10
	Засоление и солонцеватость	0,10
Экологические	Устойчивость к деградации	0,25
	Влагообеспеченность	0,15
	Биологическая активность	0,20
	Загрязнение поллютантами	0,15
Природоохранные	Средообразующие функции	0,30
	Биосферные функции	0,25
	Редкость и уникальность	0,35
	Репрезентативность	0,10

Процедура оценочного зонирования включала следующие этапы. Исходная почвенная карта была оцифрована с сохранением детальности контуров, выделение однородных участков осуществлялось с минимальной площадью 5 га. Полученные почвенные зоны

совмещены с кадастровой информацией для последующего учёта в системах ГКН. На основе интегральной балльной оценки все контуры были разделены на пять зон различной природоохранной значимости.

Разработанная методика позволила выделить пять зон различной природоохранной значимости: от I зоны (9–10 баллов, участки максимальной ценности) до V зоны (менее 6 баллов) – территории, требующие восстановительных мероприятий), с промежуточными классами, отражающими градации сохранности почв.

Расчёт кадастровой стоимости осуществлялся с применением корректирующих коэффициентов на основе типа почв и их экологической роли:

$$\text{УПКС}_{\text{почв}} = \text{УПКС}_{\text{базовый}} \times K_{\text{почв}} \times K_{\text{эколог}}, (1)$$

где $\text{УПКС}_{\text{почв}}$ – дельный показатель кадастровой стоимости с учетом типа почв; $\text{УПКС}_{\text{базовый}}$ – базовый удельный показатель кадастровой стоимости для земель ООПТ регионального значения, установленный при проведении ГКО; $K_{\text{почв}}$ – коэффициент корректировки, отражающий влияние морфологических и физико-химических свойств почв на стоимость земельного участка. Определяется как отношение балльной оценки почвы на конкретном участке к средней балльной оценке почв на всей территории ООПТ; $K_{\text{эколог}}$ – коэффициент экологической ценности, отражающий воздействие экологических и природоохранных показателей на стоимость. Определяются как отношение суммы взвешенных экологических и природоохранных групп критериев к максимально возможной сумме.

Структура корректирующих коэффициентов согласована с действующей моделью государственной кадастровой оценки $K_{\text{почв}}$, конкретизирует блок «физические характеристики», а $K_{\text{эколог}}$ – блок «экологическое состояние». Таким образом, модель не вводит новых факторов стоимости, а уточняет существующие на основе почвенной информации, что обеспечивает её методическую и правовую совместимость с действующей нормативной базой.

Валидация методики осуществлялась посредством сравнения результатов зонирования с независимыми источниками, в частно-

сти с почвенной картой, подготовленной Почвенным институтом В. В. Докучаева. Также привлекались независимые эксперты: специалисты управления по ООПТ, которые провели проверку выделенных контуров на 10 % от общей площади территории, уровень согласованности предложенной классификацией составил 84 %. Проведены логические связи между почвенными характеристиками и присвоенными баллами, выявлены и исправлены случаи несоответствий. Кроме того, результаты сопоставлены с характеристиками почвенного покрова, проведенными в научных работах по территории.

Для оценки переносимости методики была проведена её дополнительная апробация на природном парке «Маркотх» и природном орнитологическом парке в Имеретинской низменности. В обоих случаях использовалась идентичная структура критериев и весовых коэффициентов с адаптацией диапазонов балльных шкал к региональным особенностям почвообразования и ландшафтной структуры. Полученная система почвенных зон и ранжирование территории по природоохранной значимости продемонстрировали сопоставимую дифференциацию с результатами по «Анапской пересыпи» и согласуются с имеющимися данными региональных почвенных и ландшафтных исследований, что подтверждает принципиальную переносимость методики на различные типы ООПТ.

Применение почвенно-дифференцированного подхода повысило точность кадастровой оценки на 14,2 % по сравнению с традиционными методами. (рис. 1).

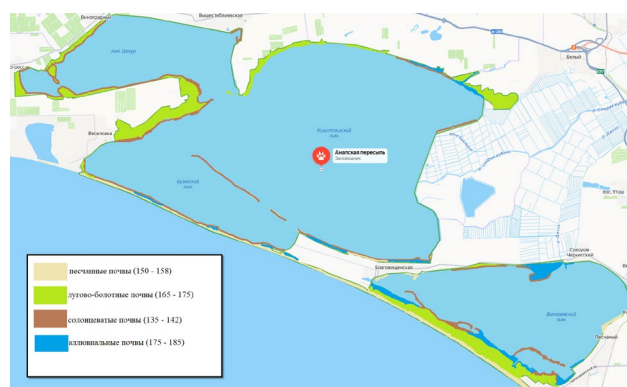


Рис. 1. Карта-схема ООПТ «Анапская пересыпь»

Максимальное повышение точности составило 14,2 % на наиболее контрастных участках, совокупный прирост точности кадастровой оценки по территории – 6,6 %.

Применение методики почвенного зонирования показало существенные различия в кадастровой стоимости по сравнению с классическим подходом (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ кадастровой стоимости ООПТ «Анапская пересыпь»

Почвенная зона	Площадь (га)	Классический подход (руб./м ²)	Предлагаемый подход (руб./м ²)	Коэффициент корректировки	Изменение стоимости (%)
Песчаные почвы	10 189,625	150	158	1,05	5,3
Лугово-болотные	13 476,605	165	175	1,06	6,1
Солонцеватые	3 286,98	135	142	1,05	5,2
Аллювиальные	5 916,56	175	185	1,06	5,7

На территории «Анапской пересыпи» выделено 15 почвенных контуров пяти типов: песчаные (45 %, гумус 0,5–1,2 %), лугово-болотные (35 %, гумус 2,5–4,8 %), солонцеватые (12 %, гумус 2,0–2,3 %), аллювиальные (8 %, органика 2,5–2,9 %).

Совокупный прирост кадастровой стоимости по сравнению с классическим методом составил 6,6 % (3,73 млрд руб.), что свидетельствует о значительном недоучёте характеристик почв при традиционной оценке.

Следует подчеркнуть, что приведённые количественные оценки получены для одного объекта – природного парка «Анапская пересыпь» и не претендуют на прямую экстраполяцию на иные категории ООПТ.

Обсуждение

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность использования характеристик почвенного покрова для оценочного зонирования ООПТ. Разработанная методика обеспечивает более обоснованное распределение налоговой нагрузки и формирует основу для дифференцированного управления охраняемыми территориями.

Методика апробирована на трёх контрастных ООПТ, расширение исследований на иные категории территорий необходимо для окончательной валидации.

Следует подчеркнуть, что количественная оценка прироста точности кадастровой оценки подробно выполнена только для природного парка «Анапская пересыпь». По двум другим ООПТ проведена пилотная качествен-

ная проверка переносимости системы критериев и весовых коэффициентов без детального воспроизведения всех расчётов. Это обуславливает ограниченную валидацию методике и необходимость дальнейшего расширения эмпирической базы.

Морфогенетические характеристики отражают сохранность природных комплексов, физико-химические показатели – плодородие и потенциал для биоразнообразия [15].

Экологические параметры оценки отражают устойчивость почв к внешним воздействиям и их способность к восстановлению. Биологическая активность почв является ключевым показателем экосистемного состояния, определяя интенсивность биогеохимических процессов и способность поддержания природного баланса. Природоохранные критерии характеризуют уникальность и научную значимость почв, что важно для определения особо ценных участков и обоснования корректировок границ ООПТ [16].

Повышение точности кадастровой оценки на 6,6 % имеет практическое значение для бюджетного планирования и экологического менеджмента, позволяя направлять дополнительные поступления на природоохранные мероприятия и более эффективно зонировать территории ООПТ.

Важно подчеркнуть, что предлагаемая система корректирующих коэффициентов не ориентирована на механическое увеличение кадастровой стоимости земель ООПТ в целом, а на её перераспределение в соответствии с реальной природоохранной ценностью и состоянием почвенного покрова. Участки с деградированными или малопродуктивными почвами

получают относительно более низкие удельные показатели, тогда как для эталонных и уникальных почвенных комплексов стоимость возрастает, что соответствует принципам экологически ориентированного налогообложения и стимулирует сохранение наиболее ценных природных территорий [17].

При этом модель не устанавливает жёсткой прямой пропорциональной зависимости между экологической ценностью и кадастровой стоимостью для всех категорий ООПТ, а уточняет распределение стоимости в рамках уже заданных нормативной моделью диапазонов удельных показателей, обеспечивая более точный учёт почвенных и экологических характеристик.

Международный опыт подтверждает актуальность экосистемного подхода и учёта почв для кадастровой оценки природных территорий. Российскую практику возможно совершенствовать с опорой на лучшие международные подходы [18,19].

Для ряда категорий ООПТ прямое увеличение кадастровой стоимости как показатель эффективности природоохранной политики действительно может быть спорным. В таких случаях предлагаемая система корректирующих коэффициентов может использоваться прежде всего для внутреннего ранжирования участков по природоохранной значимости и планирования финансирования, а не для прямого роста налоговой нагрузки. Эти ограничения требуют отдельного анализа и учёта при практическом внедрении методики, что выходит за рамки данной статьи, но намечает направления дальнейших исследований [20].

Заключение

Разработанная методика оценочного зонирования земель ООПТ, основанная на ком-

плексном учете свойств почвенного покрова, включает систему из 16 критериев, объединённых в четыре группы: морфогенетические, физико-химические, экологические и природоохранные характеристики. Применение 10-балльной шкалы позволило выделить пять зон природоохранной значимости: от территорий максимальной ценности (9–10 баллов) до территорий, требующих восстановительных мероприятий (менее 6 баллов).

Использование данной методики в кадастровой оценке позволило повысить ее точность на 6,6 % по сравнению с традиционными подходами, не учитывающими природоохранную специфику.

К основным преимуществам методики относятся комплексность подхода и адаптивность к различным условиям.

Дальнейшее развитие исследований связано с уточнением критериев и развитием дистанционных методов диагностики.

Учёт почвенного разнообразия обеспечивает выявление различий в стоимости земель внутри ООПТ, что содействует более справедливому распределению налоговой нагрузки и созданию научно обоснованной модели управления. Методика может быть адаптирована для иных ООПТ при наличии необходимых картографических данных и технических ресурсов.

Проведённая апробация на трёх контрастных по природным условиям ООПТ показала методическую состоятельность подхода и его потенциал для интеграции в действующие процедуры государственной кадастровой оценки. Вместе с тем универсальное применение методики требует дальнейшего расширения эмпирической базы, в том числе за счёт охвата различных типов охраняемых территорий в России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нешатаев М. В. Методика кадастровой оценки земель особо охраняемых природных территорий с учетом природоохранной ценности лесных экосистем. Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 203–208.
2. Присяжная А. А., Чернова О. В., Снакин В. В. Развитие системы особо охраняемых природных территорий (ООПТ) — основа сохранения биологического разнообразия природных комплексов [Электронный ресурс]. Альманах «Пространство и Время». — 2016. — Т. 11, вып. 1: Система «Планета Земля». URL: http://2227-9490e-aprov_r_e-ast11-1.2016.41 (дата обращения: 10.11.2025).
3. Карпов А. В., Аюгова Н. К. Система особо охраняемых природных территорий как основа для организации красной книги почв Ульяновской области. Актуальные вопросы агрономии, агрохимии и агроэкологии: материалы Международной научно-практической конферен-

ции, посвященной 70-летию д-ра с.-х. наук, проф. А.Х. Куликовой. Ульяновск : УГСХА им. П. А. Столыпина, 2012. С. 65–70. URL: <http://lib.ugsha.ru:8080/handle/123456789/6430>.

4. Чулкова Г. В. Основы кадастровой оценки земель и недвижимости. Смоленск : ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2019. 100 с.

5. Морфология почв : учебно-методическое пособие / сост. С. Е. Витковская. СПб., 2022. 38 с.

6. CORINE Land Cover (CLC) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/cor0-landcover> (дата обращения: 10.11.2025).

7. Чупрова В. В., Белоусов А. А., Белоусова Е. Н., Горбунова Ю. В. Оценка агроэкологического состояния почв, вовлеченных в разработку песчано-гравийных карьеров Канского района Красноярского края. Вестник КрасГАУ. 2019. № 3 (144). С. 16–21.

8. Крыленко В. В., Крыленко С. В., Крыленко М. В. Растительность прибрежно-морской геосистемы Анапской пересыпи и ее влияние на рельеф. Экология гидросферы. 2023. № 1 (9). С. 34–45.

9. Щербина А. Д., Цораева Э. Н. Функциональное зонирование особо охраняемых природных территорий регионального значения. Научный журнал КубГАУ. 2021. № 170. С. 1–9.

10. Фролова Т. И., Протазанова П. С., Антуфьева В. Ф., Антончук А. В. Сохранение биоразнообразия в Имеретинской низменности города Сочи путём создания орнитологического природного парка. Леса России и хозяйство в них. 2021. № 4 (79). С. 57–62.

11. Андреев Д. Н. Методика комплексной диагностики антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий. Географический вестник. 2012. № 4 (23). С. 4–10.

12. Иоселиани Н. А. Методические подходы к оценочному зонированию для целей государственной кадастровой оценки. Имущественные отношения в РФ. 2018. № 7 (202). С. 41–49.

13. Фирсов С. А., Баранова Т. Л., Фирсов С. С. Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов. Агрохимический вестник. 2014. № 3. С. 5–7.

14. Савельев А. А., Григорьян Б. Р., Добрынин Д. В., Мухарамова С. С., Кулагина В. И., Сахабиев И. А. Оценка почвенного плодородия по данным дистанционного зондирования земли. Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2012. № 3. С. 158–172.

15. Залибеков З. Г., Биарсланов А. Б., Галимова У. М. Концепция биологического разнообразия почв и основные черты современного этапа ее развития // Аридные экосистемы. 2014. № 1 (58). С. 5–17.

16. Коновалов А. Г., Рисник Д. В., Левич А. П., Фурсова П. В. Обзор подходов к оценке экологического состояния и нормированию качества почв. Биосфера. 2017. № 3. С. 214–229.

17. Макаров О. А., Цветнов Е. В., Строков А. С., Кубарев Е. Н., Абдулханова Д. Р. Опыт экономической оценки почв. Агрохимический вестник. 2019. № 4. С. 3–7.

18. Редникова Т. В. Правовая охрана почв: перспективы реализации экосистемного подхода. Право и политика. 2025. № 12. С. 178–191.

19. Макаров О. А., Кузнецов М. С., Цветнов Е. В., Бондаренко Е. В., Абдулханова Д. Р. Основные направления развития эколого-экономической оценки земель в Российской Федерации. Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. № 3. С. 3–15.

20. Литвинова А. А., Игнатьева М. Н., Морозова Л. М., Кубарев М. С. Методические рекомендации по экономической оценке ООПТ, реализующих природоохранные функции. Известия УГГУ. 2016. № 3 (43). С. 95–99.

REFERENCES

1. Neshataev, M. V. (2013). Methodology of cadastral valuation of lands of specially protected natural areas considering the environmental value of forest ecosystems. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 204, 203–208 [in Russian]

2. Prisyazhnaya, A. A., Chernova, O. V., & Snakin, V. V. (2016). Development of the system of specially protected natural areas (SPNA) as the basis for the conservation of biological diversity of natural complexes. *Almanakh "Prostranstvo i Vremya" [Almanac "Space and Time"]*, 11(1), Sistema "Planeta Zemlya". Retrieved from http://2227-9490e-aprov_r-e-ast11-1.2016.41 (accessed: 10.11.2025) [in Russian].

3. Karpov, A. V., Ayugova, N. K. 2012. The system of specially protected natural areas as the basis for organizing the Red Book of soils of the Ulyanovsk region. In: *Aktualnye voprosy agronomii, agrohimii i agroekologii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu d-ra s.-h. nauk, prof. A.H. Kulikova*, pp. 65-70. Ulyanovsk: UGShA im. P.A. Stolypina. URL: <http://lib.ugsha.ru:8080/handle/123456789/6430> [in Russian].

4. Chulkova, G. V. 2019. Fundamentals of cadastral valuation of land and real estate. Smolensk: FGBOU VO Smolenskaya GSH A, 100 p. [in Russian].

5. Morphology of soils: teaching aid / comp. S. E. Vitkovskaya. St. Petersburg, 2022. 38 p. [in Russian].
6. CORINE Land Cover (CLC) Electronic resource. Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/cor0-landcover> (accessed: 10.11.2025).
7. Chuprova, V.V., Belousov, A.A., Belousova, E.N., Gorbunova, Yu.V. (2019). Assessment of agro-ecological state of soils involved in development of sand and gravel quarries in Kansk district of Krasnoyarsk Krai. *Vestnik KrasGAU [Bulletin of KrasGAU]*, no. 3 (144). 16–21 [in Russian].
8. Krylenko, V.V., Krylenko, S.V., Krylenko, M.V. (2023). Vegetation of the coastal-marine geosystem of Anapa spit and its influence on relief. *Ekologiya gidrosfery [Hydrosphere Ecology]*, no. 1 (9). 34–45 [in Russian].
9. Shcherbina, A.D., Tsoraeva, E.N. (2021). Functional zoning of specially protected natural areas of regional significance. *Nauchnyy zhurnal KubGAU [Scientific Journal of KubSAU]*, no. 170. 1–9 [in Russian].
10. Frolova, T.I., Protazanova, P.S., Antufyeva, V.F., Antonchuk, A.V. (2021). Preservation of biodiversity in Imeretinskaya lowland of Sochi through creation of ornithological natural park. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh [Russia's Forests and Forestry]*, no. 4 (79). 57–62 [in Russian].
11. Andreev, D.N. (2012). Methodology of complex diagnostics of anthropogenic transformation of specially protected natural areas. *Geograficheskiy vestnik [Geographical Bulletin]*, no. 4 (23). 4–10 [in Russian].
12. Ioseliani, N.A. (2018). Methodological approaches to assessment zoning for state cadastral valuation purposes. *Imushchestvennye otnosheniya v RF [Property Relations in the RF]*, no. 7 (202). 41–49 [in Russian].
13. Firsov, S.A., Baranova, T.L., Firsov, S.S. (2014). Ecological monitoring of soil safety by heavy metal content. *Agrokhimicheskiy vestnik [Agrochemical Bulletin]*, no. 3. 5–7 [in Russian].
14. Savel'ev, A.A., Grigoryan, B.R., Dobrynin, D.V., Mukharamova, S.S., Kulagina, V.I., Sakhabiev, I.A. (2012). Assessment of soil fertility based on remote sensing data. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki [Scientific Notes of Kazan University. Series Natural Sciences]*, no. 3. 158–172 [in Russian].
15. Zalibekov, Z.G., Biarslanov, A.B., Galimova, U.M. (2014). The concept of biological diversity of soils and main features of its current development stage. *Aridnye ekosistemy [Arid Ecosystems]*, no. 1 (58). 5–17 [in Russian].
16. Konovalov, A.G., Risnik, D.V., Levich, A.P., Fursova, P.V. (2017). Review of approaches to assessment of ecological state and soil quality regulation. *Biosfera [Biosphere]*, no. 3. 214–229 [in Russian].
17. Makarov, O.A., Tsvetnov, E.V., Stokov, A.S., Kubarev, E.N., Abdulkhanova, D.R. (2019). Experience in economic assessment of soils. *Agrokhimicheskiy vestnik [Agrochemical Bulletin]*, no. 4. 3–7 [in Russian].
18. Rednikova, T.V. (2025). Legal protection of soils: prospects for implementation of ecosystem approach. *Pravo i politika [Law and Politics]*, no. 12. 178–191 [in Russian].
19. Makarov, O.A., Kuznetsov, M.S., Tsvetnov, E.V., Bondarenko, E.V., Abdulkhanova, D.R. (2023). Main directions of development of ecological and economic land assessment in the Russian Federation. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie [Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science]*, no. 3. 3–15 [in Russian].
20. Litvinova, A.A., Ignat'eva, M.N., Morozova, L.M., Kubarev, M.S. (2016). Methodological recommendations for economic assessment of protected areas implementing nature conservation functions. *Izvestiya UGGU [Izvestiya USMU]*, no. 3 (43). 95–99 [in Russian].

Об авторах

Анастасия Константиновна Кошель – преподаватель кафедры земельного права и государственной регистрации недвижимости.

Анна Михайловна Лелюхина – кандидат технических наук, доцент кафедры землеустройства и кадастров.

Author details

Anastasia K. Koshel – Lecturer, Department of Land Law and State Registration of Real Estate.

Anna M. Lelyukhina – PhD, Associate Professor, Department of Land Management and Cadastres.

Получено / Received 20.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 19.02.2026

Принята к публикации / Accepted 20.06.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.46:332

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-137-148>

Методология координатного описания линейно-протяженных объектов недвижимости

А. М. Портнов¹✉

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

e-mail: info@miigaik.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, направленного на разработку методологии координатного описания линейно-протяженных объектов кадастра недвижимости, землеустройства и мониторинга земель. Актуальность исследования обусловлена противоречием между функциональной целостностью линейно-протяженных инфраструктурных комплексов недвижимости и фрагментарностью их координатного описания в зональных местных системах координат. Решены задачи систематизации подходов к оптимизации параметров систем координатного описания, разработки аналитических моделей на основе секущих плоскостей на сфере и формул прямого преобразования геодезических координат в проекционные, анализа и оценки пространственного распределения характерных точек границ/контуров объектов ЕГРН с использованием критерия хи-квадрат (χ^2). Показано, что научная новизна определяется не отдельным выбором картографической проекции, а системой методических и технологических решений, связывающих аналитическое моделирование, предварительную обработку векторных данных ЕГРН и верификацию результатов в единую методологию.

Ключевые слова: линейно-протяженные объекты, методология координатного описания, кадастр недвижимости, землеустройство, частный масштаб, секущие плоскости на сфере

Для цитирования:

Портнов А. М. Методология координатного описания линейно-протяженных объектов недвижимости. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 137–148. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-137-148>

A methodology for the coordinate-based description of linear real estate features

A. M. Portnov¹✉

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

e-mail: info@miigaik.ru

Abstract. The article reports the findings of research dedicated to formulating a methodology for the geometric delineation of linearly extensive features pertinent to real estate cadastre, land-use planning, and land monitoring. The relevance of the study is dictated by an inherent discrepancy: while infrastructural real-estate entities exhibit holistic functional continuity, their representation in zonal local coordinate systems remains inherently discrete and fragmented. The study resolves tasks pertaining to the systematization of optimization strategies for coordinate description system parameters; the derivation of analytical models utilizing secant planes on a spherical surface and formulae for the forward conversion of geodetic coordinates to planar projections; and the assessment of the spatial distribution patterns of nodal points defining Unified State Register of Real Estate (EGRN) object boundaries via Pearson's chi-squared (χ^2) test. The fundamental contribution of the work is substantiated as being independent of any singular cartographic projection choice. Instead,

its novelty resides in an integrated framework of methodological and algorithmic procedures unifying analytical modeling, pre-processing of EGRN vector datasets, and output validation.

Keywords: linear features, coordinate description methodology, real estate cadastre, land management, local scale, secant planes on a sphere

For citation:

Portnov A. M. (2026). A methodology for the coordinate-based description of linear real estate features. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 137–148. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-137-148>

Введение

Развитие производственной и социальной инфраструктуры сопровождается формированием объектов транспорта, энергетики, связи и т. п., протяженность которых измеряется сотнями и тысячами километров. Такие объекты пересекают кадастровые районы и округа (рис. 1), муниципальные и административно-территориальные границы, включая в производственный оборот земельные участки, сооружения, объекты капитального строительства, формирующие зоны с особыми условиями использования территорий (Приказ Росреестра от 20.10.2020 № П/0387 «Об утверждении порядка установления местных систем координат». — URL: <http://www.consultant.ru>. — Текст : электронный; ГОСТ Р 70846.5-2023. Национальная система пространственных данных. Правила координатного описания пространственных объектов. — URL: <http://www.consultant.ru>. — Текст : электронный) и иные пространственные компоненты [1]. В практике земельно-имущественных отношений они могут быть определены как линейно-протяженные объекты (ЛПО-объекты), требующие единого координатного описания.

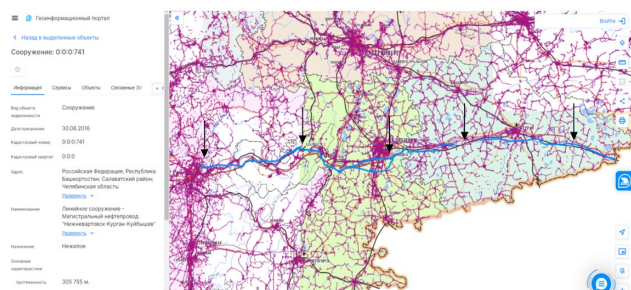


Рис. 1. Линейное сооружение –
Магистральный нефтепровод
«Нижневартовск – Курган – Куйбышев»,
кадастровый номер 0:0:0:741, протяженность
305 755 м
(синяя линия, источник –
<https://nspd.gov.ru>)

Актуальность исследования связана с тем, что действующая система координатного обеспечения кадастра недвижимости имеет зональную реализацию. Местные системы координат, основанные на проекции Гаусса – Крюгера, обеспечивают приемлемые искажения геометрических характеристик объектов учета в пределах ограниченной трехградусной координатной зоны. Если ЛПО-объект проходит через несколько таких зон, его координатное описание фрагментируется, что приводит к разрывам пространственного описания объектов [2–4].

Аналогичные проблемы координатного описания протяженных объектов существуют и в зарубежной практике. Так, для снижения проекционных искажений на железнодорожных магистралях Великобритании была разработана специализированная проекция SnakeGrid [5], обеспечивающая величину масштабного коэффициента в пределах нескольких ppm. В Германии для нужд Deutsche Bahn внедрена процедура перехода к оптимизированным низкоискаженным проекциям (LDP), позволяющая достичь точности менее 5 ppm для более чем 6 300 объектов инфраструктуры [6]. Однако такие системы координатного описания применимы исключительно для самих инженерных объектов и не учитывают особенности природных и антропогенных факторов, влияющих на функционирование ЛО-объектов, кадастрового состояния территории.

На практике, для удобства кадастрового учета в РФ, распространение зональных систем совмещено с границами административных районов, что привело к значительному превышению ширины координатных зон установленным нормам. По отдельным субъектам РФ ширина таких координатных зон достигает 8 градусов, что приводит к проек-

ционными искажениям, превышающим даже допустимые значения для карт масштаба 1 : 10 000. Такая практика координатного описания ЛП-объекта означает снижение достоверности пространственных данных ЕГРН и соответственно принятия управленческих решений на основе искаженной информации.

Соответственно, существует научная проблема, заключающаяся в отсутствии научных подходов, методик и технологических решений координатного описания линейно-протяженных объектов недвижимости, обеспечивающих связь с государственной системой координат, минимизацию проекционных искажений, достижение единства координатного описания на всей протяженности объекта, учет особенностей формирования исходных данных и нормативных критериев для практических задач землеустройства и учета имущественных комплексов.

Цель исследования – разработать методологию координатного описания линейно-протяженных объектов, обеспечивающую снижение проекционных искажений, сохранение геометрических учетных характеристик и повышение достоверности пространственного анализа в информационных системах учета недвижимости.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) систематизировать существующие методы оптимизации параметров систем координатного описания;
- 2) разработать аналитические модели проектирования систем координатного описания;
- 3) выявить особенности использования сведений ЕГРН и обосновать необходимость процедур оценки равномерности распределения и фильтрации характерных точек контуров и границ объектов учета;
- 4) оценить возможности применения аналитических моделей и технологических решений проектирования систем координатного описания объектов учета;
- 5) сформировать методологию координатного описания ЛП-объектов недвижимости как совокупность научных подходов, методик и технологических решений.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования послужили сведения ЕГРН и иные пространственные данные о линейно-протяженных объектах, нормативные акты в сфере кадастра недвижимости, землеустройства и их координатного обеспечения, а также научные работы по математической картографии [7–9], геодезическим системам координат и ГИС-технологиям [10–13]. В качестве теоретической базы использованы положения о наилучших проекциях, относящиеся к работам Тоблера [14], Эйри [15], В. В. Каврайского [16], П. Л. Чебышева [7], а также работы по численным методам оптимизации [16–21]. Структурная схема исследования включает следующие взаимосвязанные этапы: проблемно-аналитический обзор, разработку аналитических моделей, информационно-статистический анализ, верификацию результатов и определение порядка их применения в кадастровых, землеустроительных работах и мониторинге земель.

Результаты

К проблемно-аналитическому этапу следует отнести изучение особенностей формирования слоев векторных данных ЕГРН, получаемых по результатам кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности, порядок которых определен законодательством РФ, содержащих контуры линейных объектов, границы ОКС и сооружений, входящих в состав ЛП-объекта, а также необходимость учета:

- площадных характеристик антропогенных и природных объектов, входящих в зону с особым режимом использования территорий как важного элемента функционирования и формирования экономических циклов эксплуатации;
- геометрических свойств кадастровых и землеустроительных карт различной целевой направленности, обеспечивающих топологические связи объектов на требуемом уровне точности.

Их отображение в едином координатном пространстве ЛП-объекта обеспечивается

аналитическими моделями – математическими конструкциями (уравнениями и целевыми функциями), связывающими параметры проектируемой системы координат с геометрическими характеристиками ЛП-объекта учтенными в ЕГРН.

Для решений на сфере предлагается аналитический аппарат описания дуги большого круга (БК), рассматриваемой как геодезическая и малого круга (МК, криволинейная эталонная ось), относительно которой минимизируются геодезические отклонения характерных точек ЛП-объекта.

Так, например поиск пространственного положения значений широт двух точек дуги БК (φ_A, φ_B) по двум заданным долготам λ_A, λ_B (могут использоваться максимальные и минимальные значения долгот объекта), минимизирующих расхождения между фактическими широтами характерных точек и расчетными широтами проектной оси, в виде метода наименьших квадратов, представляется как

Так, например поиск пространственного положения значений широт двух точек дуги БК (φ_A, φ_B) по двум заданным долготам λ_A, λ_B (могут использоваться максимальные и минимальные значения долгот объекта), минимизирующих расхождения между фактическими широтами характерных точек и расчетными широтами проектной оси, в виде метода наименьших квадратов, представляется как

$$f(\varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_A}{\sin(\lambda_B - \lambda_A)} \right) * \sin(\lambda_i - \lambda_A) + \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_B}{\sin(\lambda_B - \lambda_A)} \right) * \sin(\lambda_B - \lambda_i) - \operatorname{tg} \varphi_i \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где φ_i, λ_i – координаты i -й точки объекта учета;

φ_A, φ_B – широты опорных точек A и B , задающих дугу БК.

В ряде случаев проектирования систем координатного описания, особенно с использованием конических проекций, существенное значение может иметь секущая плоскость на сфере, образующая МК. Малый круг на сфере определяется как линия пересечения сферы плоскостью, не проходящей через ее центр. Для задач проектирования систем координатного описания все точки МК должны находиться на одинаковом сферическом расстоянии ρ от фиксированной точки с координатами φ_0, λ_0 , называемой полюсом МК. Аналитическое описание данного условия имеет вид:

$$di(\varphi_0, \lambda_0) = \arccos(\sin \varphi_0 \sin \varphi_i + \cos \varphi_0 \cos \varphi_i \cos(\lambda_i - \lambda_0)), \quad (2)$$

где φ_0, λ_0 – координаты полюса;

φ_i, λ_i – координаты i -й характерной точки;

$di(\varphi_0, \lambda_0)$ – сферическое расстояние от φ_0, λ_0 до φ_i, λ_i .

В практической постановке задача сводится к определению таких параметров φ_0, λ_0 и ρ , при которых сумма квадратов отклонений точек от МК минимальна:

$$\Phi(\varphi_0, \lambda_0, \rho) = \sum_{i=1}^N (di - \rho)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где di – сферическое расстояние от полюса малого круга до i -й точки;

ρ – постоянное сферическое расстояние от полюса малого круга до линии МК;

$\Phi(\varphi_0, \lambda_0, \rho)$ – целевая функция.

Использование БК и МК как проектных осей позволяет перейти от нормативно заданной зональной системы к расчетной системе координатного описания, параметры которой подбираются под конкретную геометрию ЛП-объекта.

Одним из принципиально иных способов оценки проекционных искажений является показатель частного масштаба. Частный масштаб характеризует изменение линейного

элемента бесконечно малого размера при переходе с поверхности сферы или сфероида на плоскость. В рамках исследования задача проектирования системы координатного описания формализуется как поиск такого набора параметров ρ , который минимизирует отклонение частного масштаба от единицы для множества характерных точек ЛП-объекта:

$$J(p) = \min_{p \in \Omega} \sum_{i=1}^n w_i [k_i(p) - 1]^2, \quad (4)$$

где $J(p)$ – целевая функция;

p – набор оптимизируемых параметров системы координат;

Ω – область допустимых решений;

w_i – вес i -й характерной точки или группы точек;

$k_i(p)$ – частный масштаб в i -й точке при заданных параметрах p ;

n – число характерных точек.

Введение весов позволяет учитывать неодинаковую значимость осевых линий, границ земельных участков, охранных зон, сооружений и иных компонентов ЛП-объекта.

Приведем пример для косой проекции Меркатора [22], поскольку она позволяет ориентировать ось проекции по направлению проложения линейно-протяженного объекта. Для

i -й точки частный масштаб может быть записан в следующем виде:

$$J(K_i) = \sum_{\lambda_{i=1}}^{\lambda_n} \frac{k}{\sqrt{(1-A^2)}} \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$A = \sin \varphi_p \sin \varphi_i - \cos \varphi_p \cos \varphi_i \sin \left(\lambda_i - \left(\lambda_p + \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad (6)$$

где $J(K_i)$ – частный масштаб в i -й точке;

k – главный масштаб на оси проекции;

φ_p и λ_p – широта и долгота полюса проектируемой сферы;

φ_i и λ_i – координаты i -й характерной точки.

Следует отметить, что использование теории частного масштаба позволяет оптимизировать не только параметры φ_A, φ_B , но также непосредственно главный масштаб k на оси проекции (рис. 2, пример распределения характерных точек, формирующих границы охранной зоны Обского водохранилища) и для некоторых проекций – координаты центра проекции φ_c, λ_c .

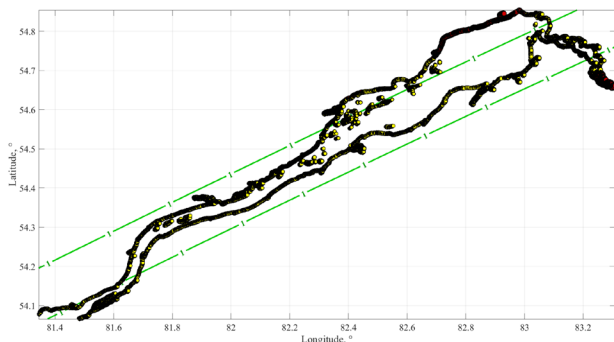


Рис. 2. Линии единичного частного масштаба (нулевого искажения) для проекции с главным масштабом на оси менее единицы

Однако практика оптимизации параметров таких систем с помощью различных алгоритмов численных методов показала, что при увеличении числа оптимизируемых параметров могут возникать расхождения в численных результатах. Поэтому методология должна включать не только численный поиск оптимальных решений, но и проверку устойчивости решения, анализ распределения остаточных искажений по всей протяженности объекта, а также сопоставление результатов с требовани-

ями прикладных кадастровых, землеустроительных задач и мониторинга земель.

Отдельное место в формируемой методологии занимает оценка распределения характерных точек ЛП-объектов, которая относится к задачам информационно-статистического характера. Это связано с тем, что векторные слои ЕГРН формируются не как статистически однородные выборки, а как результат кадастровых, землеустроительных, градостроительных и проектных работ. Поэтому распределение характерных точек в отдельных фрагментах ЛП-объекта может быть неоднородно, что, как показала практика, приводит к квазиоптимальным проектным решениям. Для оценки пространственной концентрации характерных точек объектов ЕГРН предлагается использовать функцию $f(x)$ плотности равномерного распределения вероятности и показатель хи-квадрат χ^2 [23]

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < a, x > b \\ \frac{1}{b-a}, & \text{при } a \leq x \leq b \end{cases}, \quad (7)$$

где x – наблюдаемая переменная;

a, b – минимальное и максимальное значения наблюдений в совокупности интервалов.

Функция $f(x)$ используется для оценки распределения характерных точек по широте и долготе. Критерием равномерности служит следующее выражение:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n [(\xi_i^a - \xi_i^t)^2 / \xi_i^t], \quad (8)$$

где χ^2 – расчетное значение хи-квадрат;

ξ_i^a – наблюдаемая вероятность или наблюдаемое число точек в i -м интервале;

ξ_i^t – ожидаемая вероятность или ожидаемое число точек при равномерном распределении;

n – число интервалов.

Использование критерия χ^2 как цензового оценочного показателя позволяет перейти от визуального анализа распределения характер-

ных точек к воспроизводимой процедуре предварительной фильтрации исходных данных ЕГРН. Достаточным условием принятия гипотезы о равномерном распределении, в данном случае, является приближение вычисленного по формуле (8) значения χ^2 к его критическому значению [24] (в теории должно не превышать). Использование фильтра позволяет сократить влияние концентрации характерных точек и не допускает получения квазиоптимальных решений. На рис. 3 продемонстрировано изменение положения оси на примере проекции Oblique Mercator (косая равноугольная цилиндрическая проекция Меркатора) после фильтрации характерных точек объекта ЕГРН (численный пример представлен в табл. 1).

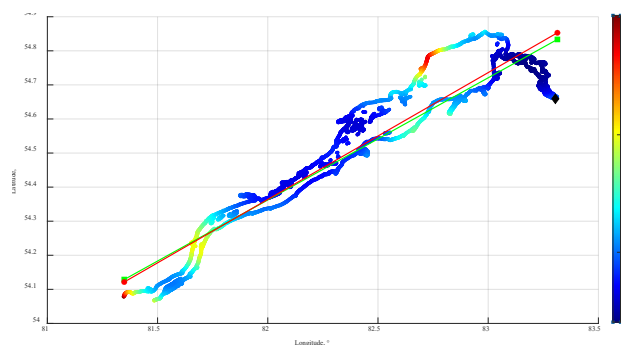


Рис. 3. Изменение положения оси косой проекции Меркатора после фильтрации характерных точек охранной зоны ЕГРН 54.00.2.12. Цветовая шкала отражает вес, обратный локальной плотности точек

Таблица 1. Результаты апробации предложенных аналитических моделей (учетный номер ЕГРН - 54.00.2.12)

	МСК	Эталонное значение на сфероиде
Площадь, кв. км	117.713	117.684
Искажение площади	1 / 4 058	
Предлагаемые технологические решения	Параметры системы координатного описания	
	По данным ЕГРН	Фильтрация данных ЕГРН
Oblique Mercator Малый круг	$\varphi_1=53.9179, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.7683, \lambda_2=83.3095$	$\varphi_1=53.9523, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.7849, \lambda_2=83.3095$
Площадь, кв. км	117.690	117.690
Искажение площади	1 / 19 614	1 / 19 614
Oblique Mercator Большой круг	$\varphi_1=54.1196, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.8335, \lambda_2=83.3095$	$\varphi_1=54.0927, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.8661, \lambda_2=83.3095$
Площадь, кв. км	117.691	117.690
Искажение площади	1 / 16 812	1 / 19 614
Oblique Mercator, сфера	$\varphi_1=54.1248, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.8296, \lambda_2=83.3095$ $k_0=0.999999$	$\varphi_1=54.1227, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.8438, \lambda_2=83.3095$ $k_0=0.999999$
Площадь, кв. км	117.689	117.689
Искажение площади	1 / 23 537	1 / 23 537
Oblique Mercator, сфероид	$\varphi_1=54.1250, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.8296, \lambda_2=83.3095$ $\varphi_c=54.5505, k=0.99999945$	$\varphi_1=54.1231, \lambda_1=81.3443$ $\varphi_2=54.8437, \lambda_2=83.3095$ $\varphi_c=54.5507, k=0.99999942$
Площадь, кв. км	117.690	117.689
Искажение площади	1 / 19 614	1 / 23 537

Практическая апробация методологии показала, что применение предложенных аналитических моделей и технологических решений позволяет существенно снизить искажения (см. табл. 1) пространственных данных объектов по сравнению с традиционными местными системами координат кадастра недвижимости.

Проведенная систематизация реализованных примеров позволила оценить устойчивость получаемых решений (табл. 2) при различных наборах исходных переменных и граничных условиях, а также классифицировать влияние предложенных аналитических моделей на эффективность проектирования систем координатного описания.

Таблица 2. Особенности применения аналитических моделей проектирования систем координатного описания (на примере объекта рис. 1, 2)

Аналитическая модель	Секущие плоскости на сфере	Частный масштаб, сфера	Частный масштаб, сфероид
Решения для длин свыше 6°	—	—	+
Устойчивость решений	+	+	$\pm$
Наборы решений:			
главный масштаб	—	—	+
центр проекции	—	+	+
стандартные параллели	+	+	+
азимут	+	+	+

В табл. 2:

«+» – решение целесообразно;

«–» – решение не целесообразно;

« $\pm$ » – применимость зависит от индивидуальных характеристик ЛП-объектов (топологии, распределения характерных точек).

Так, при использовании метода частного масштаба на сфероиде, в ряде используемых численных алгоритмов, зафиксированы результаты, носящие ситуативный характер, вызванный особенностями геометрии и распределения характерных точек.

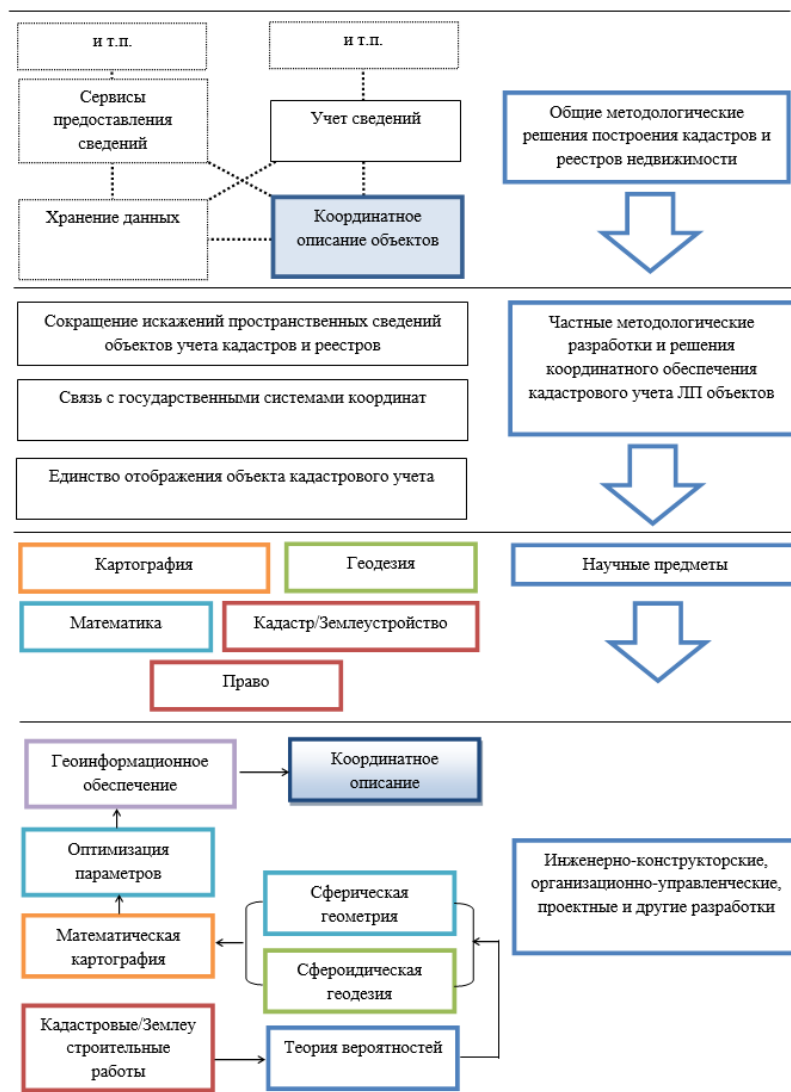


Рис. 4. Системно-структурная схема методологии изучения координатного описания ЛП-объектов

Проведенное исследование базировалось на системно-деятельном подходе. Фундаментальным принципом, заложенным в его основу, являлось понимание методологии как единства знания о деятельности и знания об объекте этой деятельности [25]. Это позволило создать не разрозненный набор приемов и методик, а систему, где свойства линейно-протяженных недвижимых комплексов напрямую определяют структуру и содержание научной и практической деятельности по их изучению. Главными отличительными признаками предложенной методологии по сравнению с существующими разрозненными методами и аналитическими решениями являются комплексность обработки и использования пространственных данных ЕГРН, учет аспектов эксплуатации и природных условий проложения, а также многоуровневая аналитическая организация исследований. Методология позволяет исключить искусственную фрагментацию (зональность) координатного описания местоположения ЛПП-объекта, обеспечить сопоставимость сведений учетных систем недвижимости отраслей экономики РФ.

Обсуждение

Параметры системы координатного описания ЛПП-объекта должны рассматриваться как расчетные величины, определяемые геометрией конкретного объекта, а не только как нормативно заданные. В этом состоит отличие предложенной методологии от традиционной практики, где ЛПП-объект описывается в заранее установленной зональной системе координат. В предлагаемой методологии система координат проектируется под объект, что обеспечивает единство его координатного описания на всей протяженности.

Установлено, что если аналитическая модель получает на входе избыточную концентрацию характерных точек в отдельных местах проложения ЛПП-объекта, условия целевой функции начинают «подстраивать» решение под такие фрагменты, а не под объект в целом. В результате может возникнуть квазиоптимальное решение: формально значение целевой функции является приемлемым, однако отдельные участки объекта сохраняют значимые искажения, распределенные неравномерно.

Следует отметить, что для одних объектов достаточно двухпараметрической оптимизации (решения на сфере), связанной с положением оси проекции; для других требуется многопараметрическая оптимизация, учитывающая такие переменные как главный масштаб и центр проекции, поверхность проектирования, свойства кривизны и кручения. Однако сферические решения могут выступать для последних в качестве начальных условий поиска (стартовых значений) оптимальных параметров численными методами. В качестве вычислительной основы могут применяться алгоритмы численных методов оптимизации: Levenberg–Marquardt, Trust-Region Reflective, Interior-Point, SQP, Nelder–Mead и других.

Результатом является объединение аналитических моделей, методов фильтрации данных, ГИС-технологий и верификации результатов в целостную методологию, задающую последовательность следующих действий:

- определить состав ЛПП-объекта;
- сформировать массив характерных точек;
- оценить их распределение и выполнить фильтрацию;
- выбрать аналитическую модель;
- рассчитать параметры проекционной системы координат;
- оценить частные масштабы и топологические эффекты;
- сопоставить результат с нормативными требованиями;
- экспортировать параметры проекции в ГИС, обеспечивая единое представление всего массива сведений ЕГРН в новой системе координатного описания.

В рамках данного исследования методология рассматривается как совокупность научных предметов, методических подходов и технологических решений, реализуемых на базе ГИС. Ее логика может быть представлена следующей записью:

$$M = \{A, F, G, V, R\}, \quad (9)$$

где M – методология координатного описания;

A – аналитические модели проектирования систем координатного описания;

F – процедуры фильтрации и оценки характерных точек;

G – ГИС-технологии подготовки, преобразования и визуализации пространственных данных;

V – процедуры верификации и сравнения искажений;

R – порядок применения результатов в кадастровых и землеустроительных работах, мониторинге земель.

Для учетных систем недвижимости результаты исследования важны как основа повышения достоверности пространственных данных и снижения топологических несоответствий, координатная основа пространственного анализа состояния и использования земель, природных ресурсов и окружающей среды [1, 3, 13].

Отдельное направление применения методологии связано с развитием применения инженерных цифровых моделей местности (СП 333.1325800.2020. Свод правил информационное моделирование в строительстве. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный). Для крупных инфраструктурных проектов погрешности в геометрических характеристиках исходных данных влияют на затраты и безопасность эксплуатации, эффективность планирования развития территорий.

Заключение

Разработанные аналитические модели проектирования систем координатного описания местоположения ЛПП-объектов позволяют перейти от зонального (фрагментированного) описания к проектируемому единому координатному пространству объекта учета. Использование секущих плоскостей на сфере, прямых уравнений преобразования координат и частного масштаба обеспечивает снижение метрических искажений и повышает достоверность пространственного анализа.

Установлено, что неравномерное распределение характерных точек может привести к

квазиоптимальным решениям нахождения параметров систем координат. Поэтому оценка распределения и фильтрация характерных точек с использованием предложенной функции плотности равномерного распределения вероятности и критерия χ^2 являются необходимой процедурой в методологии координатного описания.

Полученные новые знания о проектировании систем координатного описания повышают качество комплексной диагностики природных, природно-хозяйственных и социально-экономических территориальных систем, а также эффективность ведения государственных и корпоративных кадастров и реестров. Это демонстрирует примером практического применения методологии (см. табл. 1) в землеустроительных работах на объекте с учетным номером 54.00.2.12. В частности, показано снижение искажения площади с 1 / 4 058 (в местной системе координат) до 1 / 23 537 (предлагаемая система). Тем самым сформированная методология координатного описания линейно-протяженных объектов представляет собой целостную совокупность научных подходов, методик и технологических решений, реализуемых в среде ГИС. Она обеспечивает сохранение геометрических учетных характеристик ЛПП-объектов, единство координатного описания и связь с государственной системой координат.

Научная новизна работы определяется установлением системной взаимосвязи между аналитическими моделями проектирования систем координатного описания ЛПП-объектов, с учетом их классификации по уровню влияния на качество (сокращение искажений) описания местоположения, процедурами оценки и фильтрации характерных точек и интегральной методологией применения полученных результатов в кадастре, землеустройстве и мониторинге земель.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Портнов А. М., Загребин Г. И., Чжэньфэн Ш. Совершенствование координатной основы пространственных данных единого государственного реестра недвижимости. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 2. С. 232–243.

2. Афонин К. Ф. О выборе размеров зон в проекции Гаусса – Крюгера // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.) Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. С. 155–158.
3. Аврунев Е. И. [и др.]. О выборе систем координат для ведения кадастра недвижимости. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесостроительство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.). Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 3. С. 49–53.
4. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Местные системы координат. Существующие проблемы и пути их решения. Геопрофи. 2009. Вып. 2. С. 52–57.
5. Pliffe J. C., Arthur J. V., Preston C. The snake projection: A customised grid for rail projects. Survey Review. 2007. Т. 39. №. 304. С. 90–99.
6. Clemen C., Romanschek E. 6326 Shades of Georeferencing BIM-Low distortion projections (LDP) for the German Railway. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Т. 48. С. 47–53.
7. Чебышев П. Л. Сочинения. СПб., 1899. Т. 1. 714 с.
8. Бугаевский, Л. М. Математическая картография : учеб. для вузов. М. : Златоуст, 1998. 400 с.
9. Deakin R. E., Hunter M. N., Karney C. F. F. The Gauss–Krueger projection: Karney-Krueger equations. Victorian Regional Survey Conference. Warrnambool, 2010. P. 1–20.
10. Boljen M. The choice of the map projection for the real estate cadastre. Proceedings of the FIG Working Week. Athens, 2004.
11. Williamson I., Enemark S., Wallace J., Rajabifard A. Land Administration for Sustainable Development. Redlands, CA : ESRI Press, 2010.
12. Grant D., Enemark S., Zevenbergen J., Mitchell D., McCamley G. The Cadastral triangular model. Land Use Policy. 2020. Vol. 97. 104758.
13. Гулин В. Н., Миронов С. А., Неретин А. А. Проблема обеспечения единого координатного пространства для объектов дорожной отрасли. САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1 (4). С. 75–82.
14. Measuring the Similarity of Map Projections Waldo Tobler Cartography and Geographic Information Science, 1986. Vol. 13, Issue 2, Pages 135-139 DOI:10.1559/152304086783900103.
15. Airy G. B. Explanation of a projection by balance of errors for maps applying to a very large extent of the Earth's surface; comparison of this projection with other projections. Philosophical Magazine, 22, 409–442. 1861. DOI:10.1080/14786446108643179.
16. Каврайский В. В. Исследования по математической картографии. Л., 1933. 276 с.
17. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. 2nd ed. – Springer, 2006. 653 p.
18. Coleman T. F., Li Y. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. SIAM Journal on Optimization. 1996. Vol. 6. № 2.
19. Fahlman A. A modified Marquardt-Levenberg parameter estimation routine for MATLAB. Report NMRC. 2001. С. 01-002.
20. Холоднов В. А. и др. Открытые альтернативы matlab для решения задач многоцелевой оптимизации. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института. 2020. №. 54. С. 80–86.
21. Арановский С. В., Гриценко П. А. Инструменты численного решения задач оптимизации. СПб. : Университет ИТМО. 2016. Т. 30.
22. Snyder J. P. Map Projections: A Working Manual. U.S. Geological Survey Professional Paper 1395. Washington, DC: United States Government Printing Office. 1987. 385 p. DOI 10.3133/pp1395.
23. Теория вероятностей в пакете MATLAB : учебник для вузов. М. : Горячая линия Телеком, 2014. 611с. ISBN 978-5-9912-7005-2.
24. Chernoff H., Lehmann E. L. The use of maximum likelihood estimates in χ^2 test for goodness of fit. The Annals of Mathematical Statistics. 1954. Vol. 25. P. 579–586.

25. Щедровицкий, Г. П. Принципы и общая схема методологической организации системно-структурных исследований и разработок. Системные исследования. Ежегодник. 1981. 197 с.

REFERENCES

1. Portnov, A. M., Zagrebin, G. I., Chzhen'fen, Sh. (2020). Improving the coordinate basis of spatial data of the unified state register of real estate. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSSUGT]*, 25(2), 232–243. [In Russian]
2. Afonin, K. F. (2009). On the selection of zone sizes in the Gauss-Kruger projection. *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*, 1(1), 155–158. [In Russian]
3. Avrunev, E. I., et al. (2014). On the selection of coordinate systems for maintaining a real estate cadastre. *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*, 3(2), 49–53. [In Russian]
4. Dem'yanov, G. V., Mayorov, A. N., Pobedinskiy, G. G. (2009). Local Coordinate Systems: Existing Problems and Solutions. *Geoprofi [Geoprofi.]*, (2), 52–57. [In Russian]
5. Iliffe J. C., Arthur J. V., Preston C. The snake projection: A customised grid for rail projects. *Survey Review*. 2007. Vol. 39. No. 304. p. 90-99.
6. Clemen C., Romanschek E. (2025). 6326 Shades of Georeferencing BIM-Low distortion projections (LDP) for the German Railway. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 48. p. 47-53.
7. Chebyshev, P. L. (1899). *Sochineniya [Essays]* Vol. 1. Saint Petersburg. [In Russian]
8. Bugaevskiy, L. M. (1998). *Matematicheskaya kartografiya [Mathematical cartography]*. Moscow: Zlatoust. [In Russian]
9. Deakin, R. E., Hunter, M. N., Karney, C. F. F. (2010). The Gauss–Krueger projection: Karney-Krueger equations. In *Victorian Regional Survey Conference* (pp. 1–20). Warrnambool.
10. Boljen, M. (2004). The choice of the map projection for the real estate cadastre. In *Proceedings of the FIG Working Week. Athens*.
11. Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., Rajabifard, A. (2010). *Land Administration for Sustainable Development*. Redlands, CA: *ESRI Press*.
12. Grant, D., Enemark, S., Zevenbergen, J., Mitchell, D., McCamley, G. (2020). The Cadastral triangular model. *Land Use Policy*, 97, 104758.
13. Gulin, V. N., Mironov, S. A., Neretin, A. A. (2015). The problem of providing a single coordinate space for road industry objects. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog [SAPR and GIS for highways]*, 1(4), 75–82. [In Russian]
14. Tobler, W. (1986). Measuring the Similarity of Map Projections. *Cartography and Geographic Information Science*, 13(2), 135-139. DOI:10.1559/152304086783900103
15. Airy, G. B. (1861). Explanation of a projection by balance of errors for maps applying to a very large extent of the Earth's surface; comparison of this projection with other projections. *Philosophical Magazine*, 22, 409–442. DOI:10.1080/14786446108643179
16. Kavrayskiy, V. V. (1933). *Issledovaniya po matematicheskoy kartografii. [Research in mathematical cartography]* Leningrad. [In Russian]
17. Nocedal, J., Wright, S. J. (2006). *Numerical Optimization* (2nd ed.). *Springer*.
18. Coleman, T. F., Li, Y. (1996). An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *SIAM Journal on Optimization*, 6(2).
19. Fahlman, A. (2001). A modified Marquardt-Levenberg parameter estimation routine for MATLAB. *Report NMRC*, 01-002.
20. Kholodnov, V. A., et al. (2020). Open source alternatives to Matlab for solving multi-objective optimization problems. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta [News of the Saint Petersburg State Institute of Technology]*, (54), 80–86. [In Russian]

21. Aranovskiy, S. V., Gritsenko, P. A. (2016). *Instrumenty chislennogo resheniya zadach optimizatsii [Tools for numerical solution of optimization problems]*. Saint Petersburg: Universitet ITMO. [In Russian].
22. Snyder, J. P. (1987). Map Projections: A Working Manual. U.S. Geological Survey Professional Paper 1395. *Washington, DC: United States Government Printing Office*. DOI:10.3133/pp1395.
23. *Teoriya veroyatnostey v pakete MATLAB. [Probability theory in the MATLAB package.]* (2014). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom. [In Russian]
24. Chernoff, H., Lehmann, E. L. (1954). The use of maximum likelihood estimates in χ^2 test for goodness of fit. *The Annals of Mathematical Statistics*, 25, 579–586.
25. Shchedrovitskiy, G. P. (1981). Principles and general scheme of methodological organization of systemic-structural research and development. *In Sistemnye issledovaniya. Ezhegodnik [In Systems Research Yearbook]* (p. 197). [In Russian].

Об авторе

Алексей Михайлович Портнов – кандидат технических наук, доцент кафедры права и государственной регистрации недвижимости.

Author details

Aleksei M. Portnov – PhD, Associate Professor, Department of Law and State Registration of Real Estate.

Получено / Received 03.06.2026

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2026

Принята к публикации / Accepted 17.07.2026

Научно-практическая статья/Research article

УДК 332.1:330.322 (571.14)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-149-160>

Методическое обеспечение расчета инвестиционной привлекательности проектов по освоению земельных ресурсов на примере территории города Новосибирска

А. С. Федорчук^{1✉}, А. В. Дубровский¹

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

e-mail: sasha.fedorchuk.2014@mail.ru

Аннотация. Актуальность разработки методического обеспечения оценки инвестиционной привлекательности проектов по освоению городских земельных ресурсов обусловлена комплексом взаимосвязанных экономических, социальных и экологических факторов. Современные вызовы территориального развития требуют применения интегрированных подходов, выходящих за рамки традиционного финансового анализа. Существующие методы часто не учитывают всей полноты критериев, влияющих на эффективность использования земли в городской среде, что приводит к рискам недоинвестирования или нерационального распределения капитала. Целью исследования является разработка адаптивного метода территориально-инвестиционной оценки (АТИО), призванного снизить информационную асимметрию и минимизировать риски неэффективного использования земельных ресурсов. Методология основывается на расчете комплексного показателя инвестиционной привлекательности (КПИП), интегрирующего пять групп факторов: экономические, градостроительные, транспортно-логистические, экологические и социально-инфраструктурные. Апробация методики проведена на пяти инвестиционных проектах в различных районах города Новосибирска. Для каждого проекта выполнен детальный расчет всех компонентов АТИО с последующим формированием итогового рейтинга. Сравнение результатов с выводами традиционного финансового анализа (на примере показателя IRR) выявило существенные расхождения. Проект, признанный наиболее привлекательным по IRR, занял предпоследнее место в комплексном рейтинге АТИО, что подтверждает недостаточность исключительно финансовых критериев. Разработанный метод демонстрирует эффективность и гибкость, предоставляя инструментарий для обоснованных управленческих решений. Ключевое преимущество АТИО – возможность адаптации весовых коэффициентов в зависимости от типа проекта, стратегических приоритетов городского развития и национальных проектов, обеспечивающая тем самым повышение эффективности управления земельными ресурсами крупного города.

Ключевые слова: методика оценки, интегральный показатель, экономическая эффективность, многофакторный анализ, устойчивое развитие, городское планирование, цифровое моделирование

Для цитирования:

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. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-149-160>

Methodological framework for assessing the investment attractiveness of land-development projects: a case study of Novosibirsk

A. S. Fedorchuk¹✉, A. V. Dubrovsky¹

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

e-mail: sasha.fedorchuk.2014@mail.ru

Annotation. The development of methodological support for assessing the investment attractiveness of urban land-development projects is driven by a complex of interrelated factors. Contemporary territorial-development challenges demand integrated approaches that extend beyond conventional financial analysis. Existing methods often omit critical criteria affecting the efficient use of urban land, resulting in underinvestment or suboptimal capital allocation. The study introduces an adaptive Territorial-Investment Assessment (TIA) methodology designed to reduce information asymmetry and mitigate the risk of inefficient land use. The methodology is based on a composite Investment Attractiveness Index (IAI) that integrates five factor groups: economic, urban-planning, transport-logistics, environmental, and socio-infrastructural. The TIA framework was applied to five investment projects across different districts of Novosibirsk. For each project, detailed calculations of all TIA components were conducted and an overall ranking was produced. Comparison with conventional financial analysis, illustrated by the internal rate of return (IRR), revealed substantial discrepancies: the project ranked highest by IRR placed second-to-last in the composite TIA ranking, highlighting the limitations of finance-only evaluations. The proposed methodology demonstrates both effectiveness and flexibility, providing planners and decision makers with a robust decision-support tool. A key advantage of the TIA is its capacity to adjust weighting coefficients according to project type, municipal strategic priorities, and national programs, thereby improving the governance of urban land resources in large cities.

Keywords: assessment methodology, integral indicator, economic efficiency, multi-criteria analysis, sustainable urban development, urban planning, geospatial modeling

For citation:

Fedorchuk A. S., Dubrovsky A. V. (2026). Methodological framework for assessing the investment attractiveness of land-development projects: a case study of Novosibirsk. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 149–160. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-149-160>

Введение

Актуальность разработки методического обеспечения расчета инвестиционной привлекательности проектов по освоению земельных ресурсов населенных пунктов обусловлена комплексом взаимосвязанных экономических, социальных и экологических факторов, определяющих современные вызовы и приоритеты территориального развития [1, 2].

Проекты по освоению земель (от жилищного строительства до создания рекреационных кластеров и промышленных парков) требуют значительных капиталовложений, что выдвигает на первый план проблему объективной оценки их инвестиционной привлекательности [3, 4].

Среди основных факторов, оказывающих влияние на инвестиционную привлекательность земельных участков на территории города, можно выделить:

– стратегическую значимость земельных ресурсов: в условиях истощения экстенсивных моделей роста и глобальной конкуренции земельные ресурсы перестают рассматриваться лишь как пространственный базис для формирования промышленных комплексов. Они становятся ключевым активом, эффективное использование которого напрямую влияет на экономическую безопасность и устойчивое развитие регионов и государства в целом;

– мультипликативный социально-экономический эффект: освоение земельных участков сопровождается созданием новых рабочих

мест, развитием сопутствующей инфраструктуры и как следствие повышением инвестиционной привлекательности не только осваиваемых, но и смежных с ними пространств;

– риски, специфичные для проектов освоения земельных ресурсов: правовые (нарушение земельного законодательства), экологические, (деградация почв, загрязнение), рыночные (изменение спроса на землю, снижение доходности), инфраструктурные (повышение нагрузки на социально-бытовую инфраструктуру), глобальная нестабильность (пандемии, демографический кризис, сокращение полезных ископаемых и др.) [5];

– глобальные тренды: урбанизация, развитие экологически ориентированных технологий, энергоэффективность, устойчивое социальное развитие кардинально меняют подходы к освоению земель и специфики инвестиционных проектов.

Традиционные методы инвестиционного анализа, фокусирующиеся в основном на финансовых показателях (стоимость проекта, доходность, срок окупаемости и др.), не учитывают в полной мере специфики определенного земельного участка или его территориального окружения [6].

При этом современные инвесторы, особенно институциональные (крупные организации, такие как инвестиционные фонды, банки, страховые компании и негосударственные пенсионные фонды и др.), при принятии решений требуют прозрачной, комплексной и количественно обоснованной оценки инвестиционной привлекательности проекта [7]. Также со стороны органов государственной и муниципальной власти существует определенный запрос на эффективное управление земельными ресурсами территории и принятие взвешенных решений, например, о предоставлении земельных участков для комплексного развития территорий, изменении целевого назначения или реализации государственно-частных партнерств. Для осуществления этих целей необходимы универсальные и объективные инструменты оценки.

Разработка унифицированного методического подхода, интегрирующего оценки территориальных, финансовых, социальных, экологических и риск-факторов, позволит

снизить информационную асимметрию, минимизировать риски недоинвестирования или экономически невыгодного использования капитала, повысит доверие к проектам и обеспечит выполнение принципов эффективного использования земельных ресурсов [8].

Методическое обеспечение оценки инвестиционной привлекательности проектов по освоению земельных ресурсов может стать основой для создания системы мониторинга и ранжирования инвестиционных проектов, что будет способствовать привлечению именно тех инвестиций, которые максимально соответствуют стратегическим целям развития территории [9, 10].

Методы и материалы

Разработка адаптивного метода территориально-инвестиционной оценки основывается на расчете комплексного показателя инвестиционной привлекательности, который формируется из пяти групп факторов:

- экономический фактор;
- градостроительные факторы;
- транспортно-логистические факторы;
- экологические факторы;
- социально-инфраструктурные факторы.

Комплексный показатель инвестиционной привлекательности рассчитывается по формуле

$$\text{КПИП} = \sum_{i=1}^5 w_i \times F_i \times K_{\text{кор}}, \quad (1)$$

где w_i – весовой коэффициент i -го фактора; F_i – нормализованное значение i -го фактора; $K_{\text{кор}}$ – корректирующий коэффициент, учитывающий специфику района города.

Экономический фактор определяется на основе модифицированной формулы чистой приведенной стоимости с учетом специфики земельных проектов:

$$F_{\text{эк}} = \frac{NPV_{\text{зем}}}{I_0} \times \frac{1}{1 - R_{\text{зем}}} \times K_{\text{лик}}, \quad (2)$$

где $NPV_{\text{зем}}$ – чистая приведенная стоимость земельного проекта; I_0 – первоначальные инвестиции; $R_{\text{зем}}$ – ставка капитализации для зе-

мельных проектов в Новосибирске (принимается 12–15 %); $K_{лик}$ – коэффициент ликвидности земельного участка.

Градостроительный фактор учитывает соответствие проекта генеральному плану города и рассчитывается по формуле

$$F_{град} = K_{соотв} \times K_{плот} \times K_{выс} \times (1 + \Delta_{разв}), \quad (3)$$

где $K_{соотв}$ – коэффициент соответствия функциональному зонированию; $K_{плот}$ – коэффициент использования разрешенной плотности застройки; $K_{выс}$ – коэффициент использования разрешенной высотности; $\Delta_{разв}$ – потенциал развития территории.

$$F_{эк} = K_{возд} \times K_{шум} \times K_{озел} \times K_{вод} \times K_{почв} \times (1 - R_{экол}), \quad (5)$$

где $K_{возд}$ – коэффициент загрязнения воздуха; $K_{шум}$ – коэффициент шумового загрязнения; $K_{озел}$ – коэффициент озеленения; $K_{вод}$ – коэффициент состояния водных объектов; $K_{почв}$ – коэффициент загрязнения почв; $R_{экол}$ – экологический риск.

Социальный фактор определяется через интегральную оценку обеспеченности территории объектами социальной инфраструктуры:

$$F_{соц} = \sum_{i=1}^n w_i \times K_{обеспеч} \times K_{дост} \times K_{кач}, \quad (6)$$

где $K_{обеспеч}$ – коэффициент обеспеченности; $K_{дост}$ – коэффициент доступности; $K_{кач}$ – коэффициент качества услуг.

Предложенная методология АТИО может внести существенный вклад в развитие теории оценки земельных ресурсов через введение принципиально нового математического аппарата, основанного на многофакторной модели с адаптивными весовыми коэффициентами. В отличие от существующих подходов, опирающихся преимущественно на финансовые показатели, методика АТИО интегрирует пять групп разнородных факторов в единую систему оценки, что обеспечивает холистический взгляд на инвестиционный потенциал территории.

Транспортно-логистический фактор определяется по формуле

$$F_{тл} = \frac{1}{T_{центр}} \times D_{метро} \times D_{маг} \times K_{транз}, \quad (4)$$

где $T_{центр}$ – время доступности до центра города (в минутах); $D_{метро}$ – доступность станций метрополитена (коэффициент от 0 до 1); $D_{маг}$ – близость к магистральным улицам; $K_{транз}$ – коэффициент транзитности территории.

Экологический фактор рассчитывается по комплексной формуле, учитывающей множество параметров состояния окружающей среды:

Методология АТИО разработана с учетом возможности интеграции с современными геоинформационными системами и технологиями цифрового моделирования городской среды. Структура данных и алгоритмы расчета оптимизированы для реализации в ГИС-платформах, что обеспечивает возможность пространственного анализа и визуализации результатов оценки.

Предусмотренная возможность интеграции с BIM-технологиями и цифровыми двойниками городов открывает перспективы для динамического моделирования инвестиционной привлекательности с учетом изменений городской среды. Это позволяет проводить сценарный анализ и оценивать влияние планируемых инфраструктурных проектов на инвестиционную привлекательность территорий [11, 12].

Результаты

Город Новосибирск, являясь третьим по численности населения городом России и административным центром Сибирского федерального округа, сталкивается с комплексом вызовов в сфере управления земельными ресурсами. Площадь городских земель составляет 505,62 км², при этом наблюдается дефицит свободных территорий для развития при одновременном наличии неэффективно используемых и деградированных земель. Ана-

лиз структуры земельного фонда Новосибирска показывает, что земли населенных пунктов занимают 87,3 % территории города, земли промышленности и иного специального назначения – 8,4 %, земли особо охраняемых территорий – 2,1 %, прочие категории – 2,2 %. При этом в структуре земель населенных пунктов преобладают земли жилой застройки (34,7 %), земли общего пользования (28,3 %) и земли промышленных объектов (19,2 %).

Особенностью земельного рынка Новосибирска является высокая дифференциация стоимости земельных участков в зависимости от местоположения. Разница в кадастровой стоимости земель между центральными и периферийными районами города может достигать 15–20 раз, что существенно влияет на инвестиционную привлекательность проектов [13, 14]. Средняя кадастровая стоимость земель в границах города составляет 3 847,52 руб./м², при этом в Центральном районе она достигает 12 453,18 руб./м², а в Первомайском районе составляет 984,37 руб./м².

Действующая система оценки инвестиционной привлекательности земельных проек-

тов в Новосибирске базируется преимущественно на традиционных финансовых показателях и не учитывает специфику городской среды, транспортную доступность, экологические ограничения и социальную значимость проектов [15]. Это приводит к принятию неоптимальных инвестиционных решений и неэффективному использованию ограниченных земельных ресурсов города. Сложившаяся ситуация требует разработки и применения нового специализированного методического инструментария для оценки инвестиционной привлекательности проектов освоения земельных ресурсов.

Для апробации разработанной методики АТИО были отобраны пять реальных инвестиционных проектов освоения земельных участков в различных административных районах города Новосибирска, совокупная площадь анализируемых территорий составила 32,9 га, что представляет репрезентативную выборку для оценки эффективности разработанной методики АТИО. Они представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика инвестиционных проектов

Показатель	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
Район города	Центральный	Октябрьский	Ленинский	Кировский	Советский
Площадь участка, га	2,4	5,7	12,3	8,6	3,9
Текущее использование	Пустырь	Промзона	С/х земли	Гаражи	Частный сектор
Планируемое использование	Деловой центр	ЖК	Логистический комплекс	ТРЦ	Жилой квартал
Объем инвестиций, млн руб.	1 850	3 240	980	2 150	1 670
Срок реализации, лет	3	5	2	4	4
Кадастровая стоимость, руб./м ²	12 453	6 842	2 156	3 984	5 237

Проведен детальный расчет всех компонентов АТИО для каждого проекта, результаты расчета экономических показателей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Экономические показатели проектов

Показатель	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
NPV, млн руб.	742,3	1 156,8	287,4	634,5	498,7
IRR, %	28,4	22,7	31,2	25,8	23,9
PI (индекс доходности)	1,4	1,36	1,29	1,3	1,3
DPP (дисконт. Срок окуп.), лет	2,1	3,7	1,6	3,1	3,2
$K_{ликв}$	0,92	0,78	0,65	0,84	0,81
$F_{эк}$ (нормализ.)	0,87	0,72	0,76	0,69	0,68

Градостроительные факторы оценивались с учетом положений Генерального плана города Новосибирска и ПЗЗ (представлены в табл. 3).

Таблица 3. Градостроительные показатели

Показатель	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
$K_{соотв}$	1	0,95	1	0,9	0,85
$K_{плот}$	0,78	0,65	0,82	0,71	0,68
$K_{выс}$	0,85	0,6	0,95	0,75	0,55
$\Delta_{разв}$	0,15	0,25	0,35	0,2	0,3
$F_{град}$ (нормализ.)	0,82	0,68	0,91	0,73	0,65

Транспортная доступность анализируемых участков существенно различается в зависимости от их расположения основных транспортных развязок города и станций метрополитена (представлена в табл. 4).

Таблица 4. Показатели транспортной развязки

Показатель	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
$T_{центр, мин}$	15	25	45	35	30
Расстояние до метро, км	0,3	0,8	3,5	1,2	2
$D_{метро}$	0,95	0,82	0,35	0,68	0,5
$D_{маг}$	1	0,9	0,95	0,85	0,75
$K_{транз}$	0,9	0,75	0,85	0,8	0,7
$F_{тл}$ (нормализ.)	0,94	0,71	0,42	0,58	0,51

Экологические факторы играют важную роль в оценке инвестиционной привлекательности, в частности, для жилищно-коммунальных проектов. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Экологические показатели территорий

Показатель	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
Уровень загрязнения воздуха	7,2	5,8	4,3	6,1	5,5
Уровень шума, дБ	68	62	58	65	60
Озеленение территорий, %	12	18	25	15	22
Расстояние до промзон, км	2,1	3,5	0,25	2,8	4,2
Экологический риск	Средний	Низкий	Высокий	Средний	Низкий
$F_{экол}$ (нормализ.)	0,58	0,72	0,45	0,64	0,78

Анализ социальной инфраструктуры с учетом обеспеченности районов объектами социального назначения и потребности в их развитии представлен в табл. 6.

Таблица 6. Социально-инфраструктурные показатели

Показатель	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
Обеспеченность школами, %	115	92	78	85	88
Обеспеченность детсадами, %	108	85	72	80	82
Плотность населения, чел./га	285	195	45	120	150
Доступность поликлиник	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя	Средняя
Обеспеченность торговлей	Высокая	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя
$F_{соц}$ (нормализ.)	0,88	0,75	0,48	0,67	0,7

После расчета групп факторов, которые были описаны выше, составляется общий рейтинг инвестиционной привлекательности по методу АТИО. Результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7. Итоговые показатели инвестиционной привлекательности

Проект	$F_{эк}$	$F_{град}$	$F_{тл}$	$F_{экол}$	$F_{соц}$	КПИП	Рейтинг
1	0,87	0,82	0,94	0,58	0,88	0,818	1
2	0,72	0,68	0,71	0,72	0,75	0,716	2
3	0,76	0,91	0,42	0,45	0,48	0,604	4
4	0,69	0,73	0,58	0,64	0,67	0,662	3
5	0,68	0,65	0,51	0,78	0,7	0,664	3

Для оценки адекватности предложенной методики проведено сравнение результатов с оценками, полученными традиционными методами. Результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8. Сравнительный анализ методов оценки

Метод	Проект 1	Проект 2	Проект 3	Проект 4	Проект 5
NPV	1	2	5	3	4
IRR	2	4	1	3	5
АТИО	1	2	4	3	3
Экспертная оценка	1	2	5	3	4

Корреляция между результатами метода АТИО и экспертными оценками составляет 0,92, что говорит о высокой адекватности методики. Анализ чувствительности модели показал ее устойчивость к изменениям входных параметров. Даже при существенном изменении отдельных факторов ($\pm 20\%$) ранжирование проектов остается стабильным, что свидетельствует о робастности предложенного метода.

Результаты апробации показали, что наиболее привлекательным является Проект 1 (деловой центр в Центральном районе), несмотря на высокую стоимость земли и значительные первоначальные инвестиции. Это объясняется отличной транспортной доступностью, высокой ликвидностью и соответ-

ствием градостроительным приоритетам развития центральной части города. Проект демонстрирует оптимальное сочетание всех анализируемых факторов.

Второе место занимает Проект 2 (жилой комплекс в Октябрьском районе), который характеризуется сбалансированными показателями по всем группам факторов. Особенно следует отметить благоприятную экологическую ситуацию и хорошую обеспеченность социальной инфраструктурой, что критически важно для жилищного строительства.

Проект 3 (логистический комплекс в Ленинском районе), несмотря на высокую экономическую эффективность ($IRR = 31,2\%$), занял только четвертое место из-за низкой

транспортной доступности и слабого развития социальной инфраструктуры. Это подтверждает важность комплексного подхода к оценке земельных проектов.

Сравнение с результатами традиционных методов финансового анализа выявило существенные расхождения в оценках. Так, при использовании только показателя IRR наиболее привлекательным оказывается Проект 3, который при комплексной оценке занимает предпоследнее место. Это подтверждает недостаточность чисто финансовых критериев для оценки городских земельных проектов.

Разработанный адаптивный метод территориально-инвестиционной оценки продемонстрировал эффективность при анализе разнотипных проектов освоения земельных ресурсов в условиях города Новосибирска. Комплексный учет экономических, градостроительных, транспортных, экологических и социальных факторов позволяет получить более объективную оценку инвестиционной привлекательности по сравнению с традиционными подходами. Важным преимуществом методики АТИО является возможность адаптации весовых коэффициентов в зависимости от типа проекта и приоритетов городского развития. Так, для проектов социального назначения может быть увеличен вес социально-инфраструктурных факторов, а для промышленных объектов – транспортно-логистических.

Обсуждение

Важным преимуществом методики АТИО является возможность адаптации весовых коэффициентов в зависимости от типа проекта, приоритетов городского развития, а также приоритетных национальных проектов [16]. Так, для проектов социального назначения может быть увеличен вес социально-инфраструктурных факторов, а для промышленных объектов – транспортно-логистических [17].

Практическое применение методики АТИО позволяет решить ряд важных задач городского управления. Во-первых, обеспечивается более обоснованный отбор инвестиционных проектов для реализации на землях муниципальной собственности. Во-вторых, со-

здаются условия для оптимизации пространственного развития города с учетом комплекса факторов, а также генерального плана и мастер-плана (при наличии) [18]. В-третьих, повышается прозрачность процедур принятия решений в сфере землепользования, что является платформой для «вовлечения потребителей в процесс стратегического и операционного маркетинга территорий» [19].

Отдельно следует отметить возможность использования методики для оценки проектов освоения или развития промышленных территорий, которых в Новосибирске насчитывается более 50 с общей площадью свыше 800 га [20]. Учет градостроительного потенциала и транспортной доступности таких территорий позволяет выявить наиболее перспективные площадки для преобразований [21, 22].

Заключение

В результате проведенного исследования разработан адаптивный метод территориально-инвестиционной оценки проектов освоения земельных ресурсов, учитывающий специфику города Новосибирска. Предложенная методика базируется на комплексном анализе пяти групп факторов: экономических, градостроительных, транспортно-логистических, экологических и социально-инфраструктурных.

Математический аппарат методики включает систему нормализованных показателей и адаптивных весовых коэффициентов, что обеспечивает гибкость применения для различных типов проектов. Апробация на пяти реальных инвестиционных проектах в Новосибирске подтвердила работоспособность и эффективность предложенного подхода.

Ключевыми преимуществами методики АТИО являются: комплексность оценки, учет местной специфики, адаптивность к различным типам проектов, прозрачность расчетов и возможность автоматизации. Внедрение методики в практику муниципального управления позволит повысить обоснованность принимаемых решений в сфере землепользования и оптимизировать пространственное развитие города.

Результаты исследования имеют как теоретическую значимость, развивая методологию оценки земельных проектов, так и практическую ценность, предоставляя инструментарий для повышения эффективности управления земельными ресурсами крупного города. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с совершенствованием методов определения весовых коэффициентов и расширением спектра учитываемых факторов.

Теоретическую ценность представляет разработанная система нормализации показателей, позволяющая корректно агрегировать качественно различные параметры – от экономических индикаторов до экологических характеристик. Применение экспоненциальных функций для показателей с оптимальным значением и дифференцированных подходов к нормализации показателей прямого и обратного действия демонстрирует глубокое понимание оцениваемых процессов.

Разработанная методология адаптивного метода территориально-инвестиционной оценки представляет собой значительный шаг вперед в развитии научно-методического обеспечения управления земельными ресур-

сами. Сочетание теоретической обоснованности, методологической строгости и практической применимости делает АТИО эффективным инструментом для решения актуальных задач городского развития.

Комплексность подхода, учитывающего экономические, градостроительные, транспортные, экологические и социальные аспекты, обеспечивает получение объективной и всесторонней оценки инвестиционной привлекательности земельных проектов. Адаптивность методологии позволяет настраивать ее под специфические условия и приоритеты развития конкретной территории, что делает ее универсальным инструментом для различных типов муниципальных образований.

Успешная апробация на реальных проектах в Новосибирске и высокая корреляция с экспертными оценками подтверждают практическую ценность разработанной методологии. Ее внедрение в практику муниципального управления создаст основу для принятия обоснованных инвестиционных решений, оптимизации использования земельных ресурсов и устойчивого развития городских территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шарипов Ю. В. Оценка земельных участков и экспертиза отчетов об оценке для оспаривания кадастровой стоимости. Имущественные отношения в Российской Федерации. 2013. № 9 (144). С. 82–92. EDN RCDJXP.
2. Воевода А. С. Методика кадастровой оценки объектов недвижимости, основанная на принципах массовой оценки. Молодежь и наука: шаг к успеху : сборник научных статей Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 3-х т. Курск, 23–24 марта 2017 года / отв. Ред. А. А. Горохов. Том 1. Курск : Университетская книга, 2017. С. 64–66. EDN YKSPVV.
3. Дубровский А. В. К вопросу о разработке параметров эффективности кадастровой системы. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 6. С. 129–139. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-129-139.
4. Хлопцов. Д. М. Системные вопросы кадастровой оценки: роль института оценки в налоговой и бюджетной политике. Имущественные отношения в Российской Федерации. 2014. № 6 (153). С. 42–48. EDN SEUTZX.
5. Дерзаева Г. Г. Анализ рисков, препятствующих привлечению инвестиций в регион в условиях пандемии и глобальной нестабильности. Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12, № 2-1. С. 210–221. DOI 10.34670/AR.2022.21.15.027.
6. Грибовский С. В. Государственная кадастровая оценка и развитие города. Имущественные отношения в Российской Федерации. 2019. № 8 (215). С. 17–23. EDN LMGYOI.
7. Исаева Е. В. Анализ практики применения концепции вовлечения стейкхолдеров для разработки стратегий развития территорий и возможности их использования для реализации политики импортозамещения. Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2018. № 4 (28). С. 25–30.
8. Обляхов П. В., Фомина С. А. К вопросу применения государственной кадастровой оценки земли, как инструмента повышения эффективности землепользования. Научный альманах. 2024. № 9-3(119). С. 40–43. EDN PQIQGN.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611786 Российской Федерация. Автоматизированная система кадастровой оценки недвижимости : № 2021610951 : заявл. 02.02.2021 : опубл. 05.02.2021 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Институт развития информационных систем». EDN WQAAXW.
10. Цховребов В. С., Фаизова В. И., Никифорова А. М., Марьин А. Н. Несоответствие в кадастровой и качественной оценке земель. Вестник АПК Ставрополя. 2018. № 4 (34). С. 132–137. DOI 10.31279/2222-9345-2018-7-32-132-137. EDN VUDLMM.
11. Коковихин А. Ю., Огородникова Е. С., Уильямс Д., Плахин А. Е. Факторы институциональной среды в оценке предпринимателем инвестиционного климата муниципального образования. Экономика региона. 2017. Т. 13, № 1. С. 80–92. DOI 10.17059/2017-1-8.
12. Суворов Д. А., Карпова Д. А. Кадастровая оценка как фактор обеспечения социально-экономического развития территории. Урал – драйвер неоиндустриального и инновационного развития России : материалы I Уральского экономического форума. В 2-х т. Екатеринбург, 24–25 октября 2019 г. Отв. за выпуск Я. П. Силин, Е. Б. Дворяджина. Т. 2. Екатеринбург : Уральский государственный экономический университет, 2019. С. 182–185. EDN TORHJZ.
13. Матвеев В. В., Резвякова И. В. Инвестиционная привлекательность регионов в современных реалиях. Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Экономика. Социология. Менеджмент. 2020. Т. 10, № 4. С. 114–124.
14. Елсуков М. Ю., Маевский А. В., Чеберко Е. Ф. Инвестиционный климат и инвестиционная привлекательность макрорегионов России. Управленческое консультирование. 2019. № 12 (132). С. 70–89. DOI 10.22394/1726-1139-2019-12-70-89.
15. Махотлова М. Ш., Алимурادова З. С. Кадастровая оценка земель и экологическая оценка территории. Инновационные технологии в науке и образовании : сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 января 2017 г. Под общ. Ред. Г. Ю. Гуляева. Пенза : Наука и Просвещение, 2017. С. 134–136. EDN XQPUHN.
16. Ишамятова И. Х., Шапошников Н. А. Ценностный подход к кадастровой оценке городских территорий. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63, № 3. С. 292–299. DOI 10.30533/0536-101X-2019-63-3-292-299. EDN YNUVSP.
17. Подрядчикова Е. Д., Гиниятов И. А. Анализ использования земель города Новосибирска. Регулирование земельно-имущественных отношений в России. 2023. № 1. С. 45–53.
18. Прибышин Т. К. Инструменты решения стратегических проблем российских городов: мастер-планы или стратегии социально-экономического развития. Региональная политика, политическая география и геополитика: история и современность : материалы Международной научной конференции, посвященной 20-летию кафедры региональной политики и политической географии СПбГУ, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2022 г. Под ред. Н. М. Михеевой и Н. В. Каледина. СПб. : Издательство ВВМ, 2022. С. 549–553.
19. Положенцева Ю. С. Дифференциация регионов по уровню инвестиционной привлекательности экономики. Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2017. № 2 (20). С. 142–149.
20. Кудинова А. В. Классификация показателей комплексной оценки территорий кадастровых кварталов мегаполиса на основе факторного анализа данных. Евразийский союз ученых. 2014. № 5-6 (5). С. 41–43. EDN WAXSJH.
21. Скатов М. А. Актуальные проблемы оценки кадастровой стоимости земельных участков с учетом зон с особыми условиями использования территорий. Российский экономический интернет-журнал. 2023. № 1. EDN PGHTDB.
22. Федякин И. В. Государственная жилищная политика и развитие городов в современной России: приоритеты и основные направления. ПОИСК: Политика. Обществоведение. Искусство. Социология. Культура. 2022. № 5 (94). С. 31–45.

REFERENCES

1. Sharipov, Yu. V. (2013). Valuation of land plots and examination of valuation reports to challenge the cadastral value *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii [Property relations in the Russian Federation]*. No. 9 (144). P. 82–92. EDN RCDJXP [in Russian].
2. Voevoda, A. S. (2017). Methodology of cadastral valuation of real estate objects based on the principles of mass appraisal *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu : Sbornik nauchnykh statey Vse-*

rossiyskoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: v 3-kh tomakh, Kursk, 23–24 marta 2017 goda / Otvetstvennyy redaktor Gorokhov A. A.. Tom 1. [Youth and science: a step towards success: Collection of scientific articles of the All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists: in 3 volumes, Kursk, March 23–24, 2017 Editor-in-chief Gorokhov A. A.. Volume 1]. Kursk: Closed Joint-Stock Company "University Book". Pp. 64–66. EDN YKSPV [in Russian].

3. Dubrovsky, A. V. (2021). On the issue of developing the parameters of the effectiveness of the cadastral system *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 26, No. 6. Pp. 129–139. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-129-139 [in Russian].

4. Khloptsov, D. M. (2014). Systemic issues of cadastral valuation: the role of the valuation institute in tax and budget policy *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii [Property relations in the Russian Federation]*. No. 6 (153). P. 42–48. EDN SEUTZX [in Russian].

5. Derzayeva, G. G. (2022). Analysis of risks preventing investment attraction in the region in the context of a pandemic and global instability *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra [Economics: yesterday, today, tomorrow]* Vol. 12, No. 2-1. Pp. 210–221. DOI 10.34670/AR.2022.21.15.027 [in Russian].

6. Gribovsky, S. V. (2019). State cadastral valuation and city development / S. V. Gribovsky *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii [Property relations in the Russian Federation]*. No. 8 (215). P. 17–23. EDN LMGYOI [in Russian].

7. Isaeva, E. V. (2018). Analysis of the practice of applying the concept of stakeholder involvement to develop strategies for the development of territories and the possibility of using them to implement import substitution policies *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologiy [Vestnik Siberian Institute of Business and Information Technologies]* № 4 (28). Pp. 25–30 [in Russian].

8. Oblyakhov, P. V., Fomina, S. A. (2024). On the issue of applying state cadastral land valuation as a tool for increasing the efficiency of land use *Nauchnyy al'manakh [Scientific almanac]*. 2024. No. 9-3 (119). P. 40–43. EDN PQIQGN [in Russian].

9. Certificate of state registration of computer program No. 2021611786 Russian Federation. Automated system for cadastral valuation of real estate: No. 2021610951: declared 02.02.2021: published 05.02.2021; applicant Limited Liability Company "Institute for the Development of Information Systems". EDN WQAAXW.

10. Tskhovrebov V. S., Faizova V. I., Nikiforova A. M., Maryin A. N. (2018). Inconsistency in cadastral and qualitative assessment of lands *Vestnik APK Stavropol'ya [Bulletin of the APK of Stavropol]*. No. 4 (34). P. 132–137. DOI 10.31279/2222-9345-2018-7-32-132-137. EDN VUDLMM [in Russian].

11. Kokovikhin, A. Yu., Ogorodnikova, E. S., Williams, D., Plakhin, A. E. (2017). Factors of the institutional environment in an entrepreneur's assessment of the investment climate of a municipal entity *Ekonomika regiona [The economy of the region]* Vol. 13, No. 1. Pp. 80–92. DOI 10.17059/2017-1-8.

12. Suvorov, D. A., Karpova, D. A. (2019). Cadastral valuation as a factor in ensuring the socio-economic development of a territory *Ural - drayver neoindustrial'nogo i innovatsionnogo razvitiya Rossii : Materialy I Ural'skogo ekonomicheskogo foruma. V 2-kh tomakh, Yekaterinburg, 24–25 oktyabrya 2019 goda / Otvetstvennyye za vypusk YA.P. Silin, Ye.B. Dvoryadkina. Tom 2. [The Urals - a driver of neo-industrial and innovative development of Russia: Proceedings of the 1st Ural Economic Forum. In 2 volumes, Yekaterinburg, October 24-25, 2019 / Responsible for the release Ya. P. Silin, E. B. Dvoryadkina. Volume 2]*. Yekaterinburg: Ural State University of Economics. Pp. 182–185. EDN TORHJZ [in Russian].

13. Matveyev, V. V., Rezvyakova, I. V. (2020). Investment attractiveness of regions in modern realities *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment [Proceedings of the Southwestern State University. Series: Economics. Sociology. Management]*, 2020, vol. 10, No. 4, pp. 114–124 [in Russian].

14. Yelsukov M. Yu., Mayevskiy A. V., Cheberko Ye. F. (2019). Investment climate and investment attractiveness of macro-regions of Russia *Upravlencheskoye konsul'tirovaniye. [Management consulting]*. № 12(132). Pp. 70-89. DOI 10.22394/1726-1139-2019-12-70-89 [in Russian].

15. Makhotlova, M. Sh., Alimuradova Z. S. (2017). Cadastral valuation of lands and environmental assessment of the territory *Innovatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii : sbornik statey II*

Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 23 yanvarya 2017 goda / Pod obshchey redaktsiyey G.YU. Gulyayeva. [Innovative technologies in science and education: collection of articles from the II International scientific and practical conference, Penza, January 23, 2017 / Under the general editorship of G. Yu. Gulyaev]. Penza: "Science and Education" (IP Gulyaev G. Yu.), Pp. 134–136. EDN XQPUHN [in Russian].

16. Ishamyatova, I. Kh., Shaposhnikov N. A. (2019). Value approach to cadastral valuation of urban territories *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'yemka [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography]*. Vol. 63, No. 3. Pp. 292–299. DOI 10.30533/0536-101X-2019-63-3-292-299. EDN YNUVSP [in Russian].

17. Podryadchikova, E. D., Giniyatov, I. A. (2023). Analysis of land use in Novosibirsk // *Regulirovaniye zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii [Regulation of land and property relations in Russia]*. No. 1. Pp. 45–53 [in Russian].

18. Pribyshin, T. K. (2022). Tools for solving strategic problems of Russian cities: master plans or strategies for socio-economic development *Regional'naya politika, politicheskaya geografiya i geopolitika: istoriya i sovremennost' : Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchonnoy 20-letiyu kafedry regional'noy politiki i politicheskoy geografii SPbGU, Sankt-Peterburg, 22–23 aprelya 2022 goda [Regional Policy, Political Geography and Geopolitics: History and Modernity : Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 20th anniversary of the Department of Regional Policy and Political Geography of St. Petersburg State University, St. Petersburg, 22–23 April 2022]* Edited by N.M. Mikheeva and N.V. Kaledin. St. Petersburg: VVM Publishing House, LLC, pp. 549–553 [in Russian].

19. Polozhentseva, Yu. S. (2017). Differentiation of regions by the level of investment attractiveness of the economy *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya [Innovative economy: prospects for development and improvement]*. № 2 (20). Pp. 142–149 [in Russian].

20. Kudinova, A. V. (2014). Classification of indicators for a comprehensive assessment of the territories of cadastral quarters of a megalopolis based on factor analysis of data *Yevraziyskiy soyuz uchenykh. [Eurasian Union of Scientists]*. No. 5-6 (5). P. 41–43. EDN WAXSJH [in Russian].

21. Skatov, M. A. (2023). Actual problems of assessing the cadastral value of land plots taking into account zones with special conditions for the use of territories *Rossiyskiy ekonomicheskiy internet-zhurnal [Russian Economic Internet Journal]*. No. 1. EDN PGHTDB [in Russian].

22. Fedyakin, I. V. (2022). State housing policy and urban development in modern Russia: priorities and main directions *POISK: Politika. Obshchestvovedeniye. Iskustvo. Sotsiologiya. Kul'tura [SEARCH: Politics. Social studies. Art. Sociology. Culture]*. № 5(94). Pp. 31–45 [in Russian].

Об авторах

Александр Сергеевич Федорчук – аспирант, ассистент кафедры кадастра и территориального планирования.

Алексей Викторович Дубровский – доктор технических наук, доцент, директор Института кадастра и природопользования.

Author details

Alexander S. Fedorchuk – PhD Student, Assistant at the Department of Cadastre and Territorial Planning.

Alexey V. Dubrovsky – D.Sc, Professor, Director of the Institute of Cadastre and Nature Management.

Получено / Received 16.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.11.2025

Принята к публикации / Accepted 17.04.2026

Обзорно-аналитическая статья/Review article

УДК 528.44:332 (668.2)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-161-169>

**Современное состояние земельных отношений,
землеустройства и кадастра в Республике Бенин**

Шаби Яби Абиойе Силванус^{1✉}, А. П. Сизов¹

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Россия

e-mail: sylvanuschabi37@gmail.com

Аннотация. Целью исследования является анализ состояния земельных отношений, землеустройства и земельного кадастра в Республике Бенин на основе изучения правовой базы, кадастровых систем и международного опыта. Применяемые методы включают анализ законодательных и нормативных текстов, сравнительный анализ пяти кадастровых систем (Россия, Беларусь, Франция, Сенегал и Кот-д'Ивуар), статистический анализ данных земельного кадастра и картографическое зонирование путем наложения слоёв ГИС. Установлено, что официально зарегистрировано только 5 % земельных участков, что ставит Бенин в число наименее развитых стран Западной Африки по уровню кадастровой регистрации. Основной причиной земельных споров, составляющих около 35 % гражданских дел, является сосуществование обычного и государственного правовых режимов. Разработана четырехуровневая национальная кадастровая структура и создана карта территориального зонирования с поправочными коэффициентами К (0,64–1,1875) для дифференцированного налогообложения земли. Оригинальность исследования состоит в том, что впервые в контексте Бенина предложена интегрированная методологическая модель, сочетающая опыт европейских и западноафриканских кадастровых реформ с учетом дуализма правовых режимов землевладения.

Ключевые слова: земельные отношения, Республика Бенин, земельный кадастр, регистрация прав, геоинформационные системы, землеустройство, управление земельными ресурсами, обычное право, земельный налог

Для цитирования:

Шаби Яби Абиойе Силванус, Сизов А. П. Современное состояние земельных отношений, землеустройства и кадастра в Республике Бенин. Вестник СГУГиТ. 2026. Т. 31, № 4. С. 161–169. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-161-169>

**Land relations, land management, and cadastral practice
in the Republic of Benin: a contemporary review**

Chabi Yabi Abioye Sylvanus^{1✉}, A. P. Sizov¹

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

e-mail: sylvanuschabi37@gmail.com

Abstract. The study examines the current state of land relations, land management, and cadastral infrastructure in the Republic of Benin. The research critically assesses the national legal framework and employs a comparative analysis of international best practices to address systemic deficiencies in spatial data management. The methodology integrates doctrinal analysis of legislative and regulatory instruments with a structured comparative assessment of five national cadastral systems: Russia, Belarus, France, Senegal, and Côte d'Ivoire. Empirical validation draws on statistical processing of existing cadastral datasets and high-resolution cartographic zoning using Geographic Information

Systems, implemented through multi-layer overlay analysis. Key findings reveal a critical deficit in tenure security: only 5% of land parcels are formally registered, placing Benin among the countries with the lowest cadastral coverage rates in West Africa. Judicial statistics further indicate that approximately 35 % of civil litigation stems from jurisdictional conflicts between customary law and statutory provisions governing land ownership. In response, the authors propose a novel four-tier national cadastral framework designed to harmonize decentralized local registries with centralized state databases. To support fiscal equity, a territorial zoning model incorporating location-specific correction coefficients (K) ranging from 0.64 to 1.1875 was developed, thereby enabling differentiated land taxation based on locational utility and development potential. The primary contribution of the research is the formulation of an integrated methodological paradigm. In contrast to previous fragmented reform initiatives, the proposed model uniquely synthesizes European technical standards with West African institutional realities. It explicitly addresses the dualism of land tenure regimes by establishing a unified procedural mechanism for the recognition and registration of customary rights within a formal digital environment.

Keywords: land relations, Republic of Benin, land cadastre, rights registration, geographic information systems, land management, land resource management, customary law, land tax

For citation:

Chabi Yabi Abioye Sylvanus, Sizov A. P. (2026). Land relations, land management, and cadastral practice in the Republic of Benin: a contemporary review. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4, pp. 161–169. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-161-169>

Введение

Аграрный сектор, формирующий свыше 33 % ВВП и обеспечивающий занятость более 53 % экономически активного населения, составляет основу экономики Республики Бенин, опирающейся на земельные ресурсы [1]. Вместе с тем, система управления этими ресурсами по-прежнему остается крайне архаичной. Сбор данных о земельном фонде ведётся с 1960 г., однако функциональный государственный кадастр до сих пор не создан. Правоустанавливающий документ, свидетельство о праве собственности на землю, выдан лишь примерно на 5 % участков, главным образом в крупных городах [2, 3].

Законодательная система страны восходит к французскому колониальному праву. Закон № 2013-01, известный как Земельный кодекс 2013 года (*Code Foncier et Domanial*), закрепляет право как государственной, так и частной собственности на земельные участки. Однако его практическое применение в сельской местности остаётся крайне ограниченным. Параллельно продолжают действовать традиционные (обычно-правовые) механизмы перераспределения и наследования земли, нередко вступающие в прямое противоречие с нормами государственного права [4, 5].

Государственная геодезическая сеть включает 60 пунктов I класса и 300 пунктов II класса,

а также 7 перманентных ГНСС-станций (CORS) с точностью планового позиционирования ± 3 см. Данная инфраструктура создаёт технические предпосылки для развёртывания полноценного кадастра при условии формирования надлежащей правовой и организационной основы.

Цель настоящей статьи – комплексный анализ состояния земельных отношений в Бенине, выявление системных проблем и разработка научно обоснованных рекомендаций по созданию государственного земельного кадастра с использованием современных геомашиных технологий.

Актуальность темы исследования

Система управления земельными ресурсами в Республике Бенин сталкивается с рядом взаимообусловленных структурных проблем, которые существенно сдерживают социально-экономическое развитие страны. Отсутствие документально подтверждённых прав собственности лишает сельских землеладельцев доступа к кредитным ресурсам и тормозит развитие аграрного производства [1, 3]. По данным Министерства юстиции Республики Бенин, около 35 % гражданских дел, ежегодно поступающих в суды, связаны с земельными конфликтами [2].

Демографическое давление усугубляет ситуацию: среднегодовой прирост населения состав-

ляет 2,7 %, что в условиях ограниченного фонда пригодных для обработки земель порождает острую конкуренцию за земельные ресурсы. Одновременно участившиеся засухи на севере и наводнения на юге страны, обусловленные изменением климата, подрывают устойчивость традиционных систем землепользования [6, 7].

Влияние колониального прошлого на современные формы землевладения остаётся определяющим. Введённое французской администрацией разграничение между «государственными» и «туземными» землями породило правовой дуализм, не преодолённый с момента обретения независимости в 1960 г. Именно этот дуализм лежит в основе конфликта интересов между обладателями формальных правоустанавливающих документов и традиционными общинами, опирающимися на обычно-правовые нормы [4, 5].

Цель и задачи исследования

Цель исследования: комплексный анализ состояния земельных отношений, землеустройства и кадастра в Республике Бенин, выявление системных проблем и разработка рекомендаций по созданию государственного земельного кадастра.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- проанализировать действующее земельное законодательство Бенина и выявить правовые пробелы, препятствующие регистрации прав;
- изучить и сопоставить кадастровые системы России (ЕГРН), Беларуси (АИС ГЗК), Франции (Cadastre), Сенегала и Кот-д'Ивуара, обосновав выбор данных стран для сравнения;
- провести статистический анализ состава земельного фонда Бенина и уровня регистрации прав по категориям земель;
- выявить основные препятствия для устойчивого управления земельными ресурсами в правовом, экономическом и социальном аспектах;
- разработать структуру государственного земельного кадастра Бенина и методику дифференцированного земельного налогообложения на основе ГИС-зонирования.

Объект исследования: земельные отношения, системы землеустройства и кадастра, а также их взаимодействие с социально-экономическим развитием Республики Бенин.

Предмет исследования: земельные ресурсы Республики Бенин, а также правовые,

экономические и социальные аспекты их использования и управления.

Методика исследования

В работе применяется комплекс взаимодополняющих методов:

- анализ законодательных и нормативных актов: систематическое изучение Земельного кодекса Бенина 2013 года (Закон № 2013-01), Рамочного закона о территориальном планировании 2018 года (LCAT) и соответствующих актов исследуемых стран;
- кейс-стадии: сравнительный анализ пяти кадастровых систем – российской (ЕГРН), белорусской (АИС ГЗК), французской (Cadastre napoléonien), сенегальской (Plan Foncier Rural) и ивуарийской (Code Foncier Rural). Выбор стран обусловлен следующим: Россия и Беларусь располагают наиболее развитыми постсоветскими автоматизированными информационными системами государственного земельного кадастра [8, 9]; Франция является источником правовой модели, унаследованной Бенином [10, 11]; Сенегал и Кот-д'Ивуар отличаются сопоставимым историко-правовым контекстом и успешно реализовали частичные кадастровые реформы [5];
- статистический анализ: обработка данных INSAE (2022), IGN Bénin и Министерства сельского хозяйства Бенина о составе земельного фонда, уровне регистрации прав и динамике земельных споров;
- картографический анализ и оверлейное зонирование: создание карты-схемы территориального зонирования в ГИС-среде путём наложения тематических слоёв, природные зоны, транспортная доступность, агропедологический потенциал и рыночные цены на землю (сделки 2018–2022 гг.).

Описание района исследования

Республика Бенин расположена в Западной Африке (6–12° с.ш., 1–3° в.д.) и занимает площадь 112 622 км². На юге страна омывается Атлантическим океаном (протяжённость береговой линии – 125 км). Бенин граничит с Того на западе, Буркина-Фасо на северо-западе, Нигером на северо-востоке и Нигерией на востоке. Административная столица – Порто-Ново; фактическая резиденция правительства и главный экономический центр – Котону [12].

В географическом отношении страна подразделяется на пять крупных зон: прибрежная лагунная низменность (юг), плато Абомей (центр), водораздел рек Уэме и Ниэгу (центро-запад), горный массив Атакора (северо-запад, высоты до 641 м) и аллювиальные равнины бассейна реки Нигер (северо-восток). Климат меняется от субэкваториального на юге (два дождливых сезона) до суданского на севере (один дождливый сезон). Главная река – Уэме.

Численность населения составляет около 13,7 млн человек (2023 г.) при среднегодовом приросте 2,7 %; более 60 % жителей проживает в сельской местности. Административно страна разделена на 12 департаментов и 77 муниципалитетов. Структура, положенная в основу предлагаемого кадастрового деления территории, представлена на рис. 1.

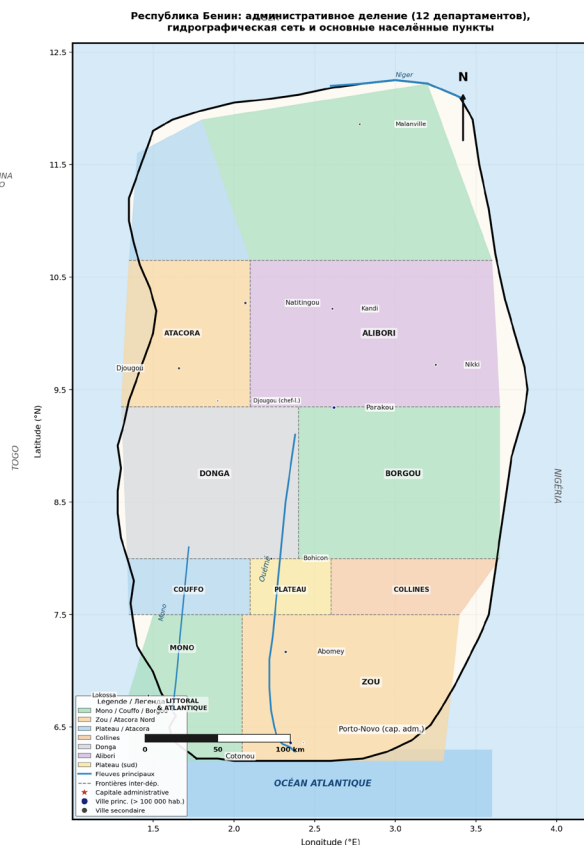


Рис. 1. Составлено авторами по: IGN Bénin (2022), OpenStreetMap contributors (2023). Проекция: WGS 84.

Рис. 1. Республика Бенин: административное деление (12 департаментов), гидрографическая сеть и основные населённые пункты. Составлено авторами по: IGN Bénin (2022), OpenStreetMap contributors (2023). Проекция: WGS 84. Карта иллюстрирует административное деление, положенное в основу предлагаемой структуры кадастровых округов

Рельеф страны представлен на гипсометрической карте (рис. 2), созданной по данным миссии SRTM (NASA, 2000 г.) с разрешением 30 м. Эти данные используются при кадастровом зонировании для разграничения территорий по агропотенциалу и риску затопления, что отражается в значениях поправочного коэффициента K земельного налога.

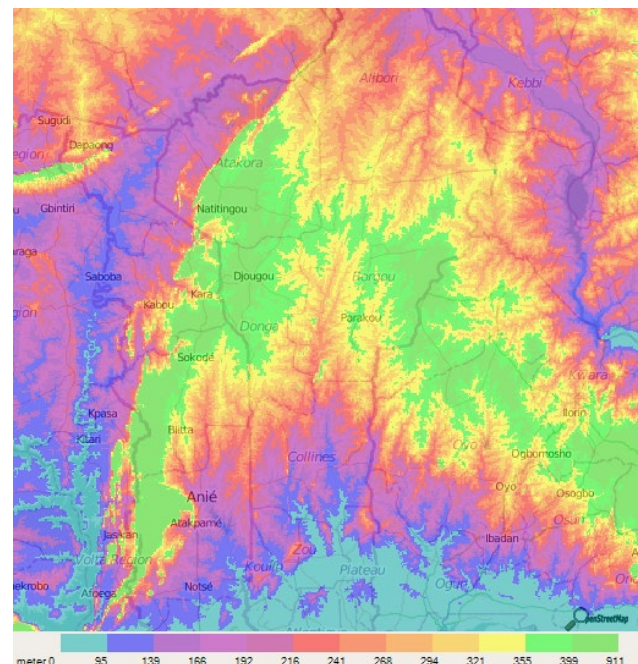


Рис. 2. Гипсометрическая карта Республики Бенин (источник: NASA SRTM, 2000 г.; лицензия CC BY-SA). Высоты: 0–911 м над уровнем моря. Применяется для дифференциации агропотенциала территории и оценки риска затопления при кадастровом зонировании.

Обзор литературы

Анализ земельных отношений в Западной Африке образует устойчивое направление международных исследований. Тулмин и Куан [4] заложили теоретические основы, продемонстрировав принципиальное противоречие между формальными кадастровыми системами западного образца и традиционными (обычно-правовыми) режимами землеустройства: авторы показывают, что механическое перенесение европейских моделей без учёта местной специфики ведёт к маргинализации уязвимых групп населения и обострению конфликтности. Данный вывод подтвер-

ждаются последующими исследованиями Котулы и др. [13], посвящёнными массовым приобретениям земель в Африке.

Применительно к Бенину ключевыми источниками служат работы Атанасу [2] и Агбо [3]. Первый автор детально анализирует правовые пробелы Земельного кодекса 2013 года и документирует уровень регистрации (~5 %); второй предлагает эмпирическую оценку эффективности Сельских земельных комитетов (СЗК / CFV). Предварительные данные Агбо [3], собранные в 12 муниципалитетах Бенина, свидетельствуют о том, что в населённых пунктах с активными СЗК, включающими женщин, фиксируется меньше земельных конфликтов (тенденция, требующая подтверждения на более широкой выборке).

Для понимания правовой основы принципиальное значение имеет французская кадастровая система (Cadaastre napoléonien), описанная Лепети и Пюмен [10]: именно она является прямым прообразом правовой модели, унаследованной Бенином от периода колониального управления. Поэтапная цифровизация французского кадастра и переход к полностью электронному реестру задают актуальный технологический ориентир [10].

Западноафриканский опыт представлен двумя значимыми прецедентами. В Сенегале реализован «Plan Foncier Rural», сочетающий государственный реестр с картографированием обычно-правовых притязаний [5]: по данным Лавинь Дельвиля, охват регистрацией вырос с 8 до 18 % за семь лет. В Кот-д'Ивуаре Закон о сельском земельном кодексе (1998) установил механизм поэтапной конверсии традиционных прав в формальные правоустанавливающие документы [14]. Релевантность этих примеров для Бенина обусловлена общим историко-правовым контекстом (французское колониальное право).

Технологические аспекты автоматизации кадастра освещены применительно к российской системе ЕГРН [8] и белорусской АИС ГЗК [9]. Экономическое измерение проблемы рассмотрено Дайнингером и Байерли [15], установившими прямую корреляцию между уровнем регистрации прав и производительностью аграрного сектора. Участие женщин в земельных правоотношениях исследовано Джованарелли и др. [16]. Проблематика земельного налогообложения в развивающихся странах систематизирована в докладе ФАО [17].

Таким образом, имеющаяся литература охватывает правовое, социальное, технологическое и экономическое измерения проблемы по отдельности, однако комплексного исследования, интегрирующего все эти аспекты применительно к современным условиям Бенина, не существует. Настоящая работа призвана восполнить данный пробел.

Результаты

Статистический анализ земельного фонда. На основе данных Национального института статистики и экономического анализа Бенина (INSAE, 2022), Министерства сельского хозяйства и IGN Bénin составлена комплексная характеристика земельного фонда страны (табл. 1).

Таблица 1. Состав и уровень регистрации земель Республики Бенин (2022 г.)

Категория земель	Площадь, тыс. га	Доля, %	Зарег. уч., %	Осн. проблемы
Пашня и многолетние культуры	2 630	23,4	≈ 8	Граничные споры
Пастбища и луга	2 866	25,4	≈ 2	Трансгумация
Леса и кустарники	4 052	36,0	0	Нет кадастра
Земли населённых пунктов	580	5,2	≈ 27	Спекуляция
Прочие земли	1 134	10,0	≈ 3	—
ИТОГО	11 262	100	≈ 5	—

Составлено авторами по данным INSAE (2022), IGN Bénin и Министерства сельского хозяйства Бенина (2023).

Уровень регистрации в 5 % является одним из самых низких в Западной Африке: для сравнения, в Сенегале зарегистрировано около 15 % участков, в Кот-д'Ивуаре, около 12 % [5]. Статистика земельных споров подтверждает остроту проблемы: Министерство юстиции Бенина ежегодно регистрирует

от 12 000 до 15 000 обращений по земельным конфликтам, что составляет около 35 % гражданских дел [2].

Правовая база: дуализм режимов и ключевые законодательные акты. Система земельного права Бенина включает три уровня регулирования: Земельный кодекс 2013 года (Закон № 2013-01), Рамочный закон о территориальном планировании 2018 года (LCAT № 2018-06) и Закон о децентрализации 2015 года [11, 18]. Кодекс закрепляет право частной собственности на землю и регулирует выдачу правоустанавливающих документов. LCAT определяет принципы стратегического планирования использования территории и разграничивает компетенции государства и органов местного самоуправления в сфере земельного управления.

Главное противоречие системы обусловлено сосуществованием государственного (Земельный кодекс) и обычно-правового режимов. В сельских районах около 80 % земельных сделок совершается в рамках обычного права — устно, в присутствии свидетелей-старейшин, без какого-либо административного оформления [3]. Это порождает существенную правовую уязвимость, прежде всего для женщин (лишённых права наследования по обычному праву) и для мигрантов.

Кадастровая система: сравнительный анализ и предложения. По результатам сравнительного анализа пяти кадастровых систем разработана четырёхуровневая архитектура государственного земельного кадастра Бенина (рис. 3), соответствующая административному делению страны и адаптированная с учётом опыта российской системы ЕГРН [8].

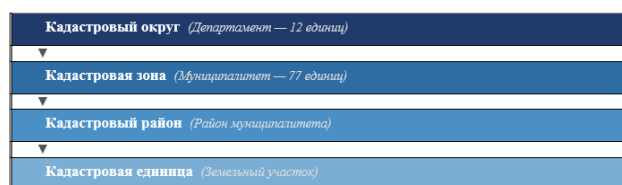


Рис. 3. Структура кадастрового деления территории Республики Бенин (предложение авторов). Разработана на основе сравнительного анализа систем ЕГРН (Россия) [8] и Cadastre napoléonien (Франция) [10]; адаптирована к административному устройству Бенина: 12 департаментов / 77 муниципалитетов

Техническая реализация Автоматизированной информационной системы государственного земельного кадастра (АИС ГЗК) Бенина предусматривает реляционную базу данных на платформе MS SQL Server со схемами Cadastre, Sujet и Juridique для разграничения технических, субъектных и юридических атрибутов. Для оптимизации пространственных запросов применяются R-tree-индексы [8, 9].

Карта зонирования для расчёта земельного налога. Методика зонирования основана на оверлейном анализе в ГИС-среде: наложены четыре тематических слоя, природное зонирование (IGN Bénin), транспортная доступность, агропедологический потенциал (почвенная карта ORSTOM, 1992 г.) и рыночные цены на землю (нотариальные сделки 2018–2022 гг.). Выделено семь территориальных зон с поправочными коэффициентами K от 0,64 до 1,1875 (рис. 4). Итоговая сумма земельного налога рассчитывается как произведение базовой ставки на значение K соответствующей зоны.

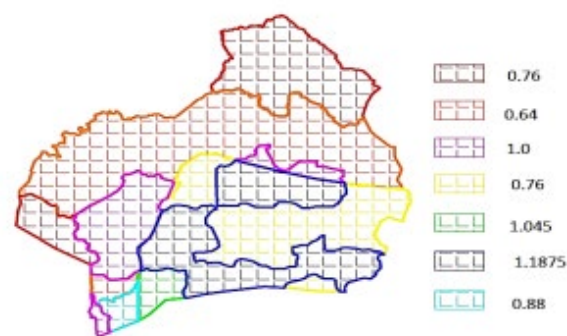


Рис. 4. Карта-схема территориального зонирования Республики Бенин по величине поправочного коэффициента K для расчета земельного налога. Составлена авторами методом оверлейного зонирования в ГИС по данным: IGN Bénin, ORSTOM (почвенная карта, 1992 г.), нотариальные сделки 2018–2022 гг.

Обсуждение

Полученные результаты вписываются в контекст предшествующих исследований, вместе с тем позволяя сформулировать ряд

оригинальных выводов. Установленный уровень регистрации (~5 %) подтверждает тезис Тулмина и Куана [4] о том, что в условиях доминирования обычно-правовых режимов формальный кадастр воспринимается сельским населением как чуждый и неприоритетный инструмент. Тем не менее настоящее исследование показывает, что создание цифровой геодезической инфраструктуры (ГНСС-сеть, ГИС) существенно снижает транзакционные издержки регистрации, тем самым повышая её привлекательность [15].

С точки зрения выбора модели реформирования наиболее релевантным для Бенина является сенегальский опыт «Plan Foncier Rural». По данным Лавинь Дельвиля [5], двухуровневая система позволила увеличить охват регистрацией с 8 до 18 % за семь лет. Применение аналогичной модели в Бенине с опорой на существующую сеть СЗК представляется вполне обоснованным.

Применительно к участию женщин в управлении земельными ресурсами предварительные данные Агбо [3], собранные по выборке из 12 муниципалитетов Бенина, фиксируют тенденцию к сокращению земельных конфликтов в населённых пунктах с активными СЗК, включающими женщин. Данная тенденция согласуется с выводами международной литературы о позитивной роли инклюзивного участия в урегулировании земельных споров [16], однако требует подтверждения на более широкой статистической базе в ходе последующих исследований.

Карта кадастрового зонирования с коэффициентами K обеспечивает самостоятельный научный вклад: в отличие от российской методики кадастровой стоимости, опирающейся преимущественно на рыночные показатели, предлагаемый подход дополнительно учитывает агропотенциал территории и транспортную доступность, параметры, особенно значимые для аграрных экономик Западной Африки [17]. Это позволяет избежать искажения налоговой базы в пользу городских и пригородных земель.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

– земельные отношения в Республике Бенин характеризуются системным кризисом, проявляющимся в крайне низком уровне регистрации прав (~5 %), устойчивом дуализме правовых режимов (государственного и обычно-правового) и отсутствии функционального государственного кадастра. Следствием является высокая конфликтность землепользования (~35 % гражданских дел) и сдерживание аграрных инвестиций;

– сравнительный анализ кадастровых систем России, Беларуси, Франции, Сенегала и Кот-д'Ивуара показывает, что для условий Бенина наиболее приемлема двухуровневая модель, сочетающая государственный реестр с параллельным документированием обычно-правовых притязаний через сельские земельные комитеты;

– разработанная четырёхуровневая структура государственного земельного кадастра Бенина и методика зонирования с коэффициентами K (0,64–1,1875) образуют практическую основу для поэтапного реформирования земельных отношений в стране.

Правительству Республики Бенин рекомендуется:

– принять Закон о государственном земельном кадастре, закрепляющий четырёхуровневую структуру кадастрового деления и механизмы параллельного документирования обычно-правовых притязаний;

– реализовать программу оцифровки планов земельных участков с интеграцией в единую ГИС-платформу на базе существующей геодезической инфраструктуры (7 CORS-станций, 360 геодезических пунктов);

– ввести дифференцированное земельное налогообложение на основе разработанной схемы зонирования с коэффициентами K ;

– обязать муниципалитеты обеспечить представительство женщин в составе СЗК и земельных комиссий не менее 30 %.

Перспективы дальнейших исследований: пилотная апробация методики зонирования в двух-трех муниципалитетах; оценка эффективности двухуровневой модели регистрации применительно к условиям Бенина на расширенной статистической базе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adediran O.A. Land management and sustainable rural development in West Africa., London : Routledge, 2020. 214 p.
2. Atanassou M. Foncier rural au Bénin : état des lieux et perspectives. Cotonou : INSAE, 2021. 94 p.
3. Agbo V. Les comités fonciers villageois au Bénin : rôle et efficacité : thèse de doctorat. Abomey-Calavi : Université d'Abomey-Calavi, 2020. 78 p.
4. Toulmin C., Quan J. Evolving Land Rights, Policy and Tenure in Africa.-London : DFID/IIED/NRI, 2000. 362 p.
5. Lavigne Delville Ph. Formalising land rights in West Africa : the different faces of tenure security. *Land Use Policy*. 2017. Vol. 62. P. 195–204. DOI : 10.1016/j.landusepol.2016.12.030.
6. Akinyemi J. O., Adediran O. A. Sustainable Agriculture and Land Management Practices in West Africa // *Environmental Sustainability*. 2021. Vol. 4, № 2. P. 159–172.
7. Duflo E., Kremer M. Use of Randomized Control Trials in Evaluation of Rural Development Projects // *American Economic Review*. 2022. Vol. 112, № 5. P. 147–183.
10. Lepetit B., Pumain D. Temporalités urbaines. Paris : Anthropos/Economica, 2019. 316 p.
11. République du Bénin. Loi n° 2013-01 portant Code Foncier et Domanial en République du Bénin. Cotonou : Journal Officiel de la République du Bénin, 2013.
8. Гальченко С. А., Сизов А. П. Автоматизированные информационные системы государственного земельного кадастра. М. : МИИГАиК, 2018. 248 с.
9. Гриб В. И. Проблемы устойчивого развития сельских территорий. Минск : Белорусская наука, 2020. 135 с.
12. INSAE. Recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-5). Cotonou : INSAE, 2023. 118 p.
18. République du Bénin. Loi-cadre n° 2018-06 portant orientation de l'aménagement du territoire (LCAT). Cotonou : Journal Officiel, 2018.
13. Cotula L., Vermeulen S., Leonard R., Keeley J. Land grab or development opportunity? Agricultural investment and international land deals in Africa. London : IIED/FAO/IFAD, 2009. 130 p.
14. République de Côte d'Ivoire. Loi n° 98-750 du 23 décembre 1998 portant Code Foncier Rural. Abidjan : Journal Officiel, 1998.
15. Deininger K., Byerlee D. Rising global interest in farmland : can it yield sustainable and equitable benefits? Washington D. C. : World Bank, 2011. 264 p.
16. Giovarelli R., Wamalwa B., Hannay L. Land Tenure, Property Rights, and Gender. Washington D.C. : USAID, 2013. 52 p.
17. FAO. Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests. Rome : FAO, 2012. 48 p.

REFERENCES

1. Adediran O. A. (2020). *Land management and sustainable rural development in West Africa.*, London : Routledge, 214 p.
2. Atanassou M. (2021). *Foncier rural au Bénin : état des lieux et perspectives*. Cotonou : INSAE, 94 p.
3. Agbo V. (2020). *Les comités fonciers villageois au Bénin : rôle et efficacité : thèse de doctorat*. Abomey-Calavi : Université d'Abomey-Calavi, 78 p.
4. Toulmin C., Quan J. *Evolving Land Rights, Policy and Tenure in Africa*.-London : DFID/IIED/NRI, 2000.-362 p.
5. Lavigne Delville Ph. (2017). Formalising land rights in West Africa : the different faces of tenure security. *Land Use Policy*. Vol. 62. P. 195–204. DOI : 10.1016/j.landusepol.2016.12.030.
6. Akinyemi J. O., Adediran O. A. (2021). Sustainable Agriculture and Land Management Practices in West Africa. *Environmental Sustainability*. Vol. 4, № 2. P. 159-172.

7. Duflo E., Kremer M. (2022). Use of Randomized Control Trials in Evaluation of Rural Development Projects. *American Economic Review*. Vol. 112, № 5. P. 147–183.
10. Lepetit B., Pumain D. (2019). Temporalités urbaines. Paris : Anthropos/Economica, 316 p.
11. République du Bénin. *Loi n° 2013-01 portant Code Foncier et Domanial en République du Bénin*. -Cotonou : Journal Officiel de la République du Bénin, 2013.
8. Galchenko S. A., Sizov A. P. (2018). *Avtomatizirovannyye informatsionnyye sistemy gosudarstvennogo zemel'nogo kadastra. [Automated Information Systems for the State Land Cadastre]*. Moscow: MII GAIK, 248 p.
9. Grib V. I. (2020). *Issues of Sustainable Rural Development. [Problemy ustoychivogo razvitiya sel'skikh territoriy]* Minsk: Belaruskaya Navuka, 135 p.
12. INSAE. Recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-5). - Cotonou : INSAE, 2023. 118 p.
18. République du Bénin. *Loi-cadre n° 2018-06 portant orientation de l'aménagement du territoire (LCAT)*. - Cotonou : Journal Officiel, 2018.
13. Cotula L., Vermeulen S., Leonard R., Keeley J. (2009). Land grab or development opportunity? Agricultural investment and international land deals in Africa. - London : IIED/FAO/IFAD, 130 p.
14. République de Côte d'Ivoire. *Loi n° 98-750 du 23 décembre 1998 portant Code Foncier Rural*. Abidjan : Journal Officiel, 1998.
15. Deininger K., Byerlee D. (2011). Rising global interest in farmland : can it yield sustainable and equitable benefits? Washington D.C. : World Bank, 264 p.
16. Giovarelli R., Wamalwa B., Hannay L. (2013). Land Tenure, Property Rights, and Gender. Washington D.C. : USAID, 52 p.
17. FAO. Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests. *Rome* : FAO, 2012. 48 p.

Об авторах

Александр Павлович Сизов – доктор технических наук, профессор кафедры землеустройства, кадастра и мониторинга земель.

Шабби Яби Абиойе Силванус – аспирант кафедры землеустройства, кадастра и мониторинга земель.

Author details

Aleksandr P. Sizov – DSc, Professor, Department of Land Management, Cadastre, and Land Monitoring.

Shabi Yabi Abioye Sylvanus – PhD Student, Department of Land Management, Cadastre, and Land Monitoring.

Получено / Received 14.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 01.06.2026

Принята к публикации / Accepted 16.06.2026

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 004:528.44

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-170-179>

**Информационная модель установления границ зон
с особыми условиями использования территорий**

А. К. Ямилова^{1,2✉}, М. А. Губанищева², Е. И. Аврунев¹, В. В. Ознамец³

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

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск,
Российская Федерация

³Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва,
Российская Федерация

e-mail: aliyakonstantinovna@mail.ru

Аннотация. Эффективность реализации правового режима зон с особыми условиями использования территорий определяется полнотой и достоверностью сведений, вносимых в Единый государственный реестр недвижимости. Современная практика характеризуется разрозненностью данных о содержании ограничений и отсутствием унифицированных подходов к пространственному описанию границ, что обусловлено нормативными противоречиями и недостаточной методической проработкой процедуры установления таких зон. Цель исследования – разработка информационной модели установления границ зон с особыми условиями использования территорий, обеспечивающей повышение правовой определённости ограничений, точности пространственных данных и их интеграции в цифровую среду. В работе применены методы сравнительного анализа нормативно-правовой базы и научно-методических публикаций, систематизации факторов формирования границ и геоинформационного моделирования. Выявлены противоречия в требованиях к описанию правового режима зон при внесении сведений в реестр границ; предложена классификация факторов установления границ и обоснованы способы их формирования (нормативный, проектно-ориентированный, проектно-расчётный). Разработана информационная модель, включающая последовательность действий от принятия решения об установлении зоны до внесения сведений в ЕГРН с переходом к трёхмерному пространственному представлению границ. Предложенный подход повышает достоверность сведений, снижает риск ошибок и может быть использован при совершенствовании кадастровой деятельности и развитии Национальной системы пространственных данных.

Ключевые слова: зона с особыми условиями использования территорий, информационная модель, пространственные данные, Единый государственный реестр недвижимости, реестр границ, 3D-модель

Для цитирования:

Ямилова А. К., Губанищева М. А., Аврунев Е. И., Ознамец В. В. Информационная модель установления границ зон с особыми условиями использования территорий. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 170–179. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-170-179>

An information model for establishing boundaries of zones with special land use conditions

A. K. Yamilova^{1,2✉}, M. A. Gubanishcheva², E. I. Avrunev¹, V. V. Oznamets³

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

² Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: aliyakonstantinovna@mail.ru

Abstract. The efficiency of enforcing the legal regime governing zones with special land use conditions (ZSLUC) depends critically on the completeness and accuracy of data recorded in the Unified State Register of Real Estate (EGRN). Contemporary cadastral practice in Russia is characterized by systemic fragmentation in the specification of restrictions and the absence of standardized methodologies for delineating spatial boundaries. These deficiencies originate in legislative inconsistencies and an underdeveloped procedural framework for zone establishment. This study aims to develop a comprehensive information model for establishing ZSLUC boundaries to enhance the legal certainty of restrictions, improve the precision of spatial datasets, and facilitate their seamless integration into digital governance environments. The methodology combines comparative analysis of the regulatory framework and scholarly literature, systematic classification of boundary-defining factors, and geoinformation modeling. The research reveals critical contradictions in statutory requirements for describing zonal legal regimes during their entry into the Registry of Boundaries. A novel taxonomy of boundary-establishment determinants is proposed, substantiating three primary modalities of zone formation: normative, design-oriented, and analytical-design (design-calculation-based). Building on this classification, a robust information model is formulated that maps the end-to-end workflow from the administrative decision to establish a zone through to its registration in the EGRN, incorporating a transition toward volumetric (3D) spatial representation of boundaries. Implementation of the proposed model significantly improves data reliability while mitigating risks associated with cartographic and semantic errors. The findings offer practical implications for optimizing cadastral operations and provide a foundational contribution to the development of the National Spatial Data System.

Keywords: zone with special conditions for land use, information model, spatial data, Unified State Register of Real Estate, registry of boundaries, 3D model

For citation:

Yamilova A. K., Gubanishcheva M. A., Avrunev E. I., Oznamets V. V. (2026). An information model for establishing boundaries of zones with special land use conditions. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 170–179. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-170-179>

Введение

Зоны с особыми условиями использования территорий (ЗОУИТ) являются одним из ключевых инструментов правового регулирования землепользования и застройки, обеспечивающих защиту жизни и здоровья населения, охрану окружающей среды, объектов инженерной инфраструктуры и культурного наследия. Эффективность реализации правового режима ЗОУИТ в значительной степени определяется корректностью установления их пространственных границ и достоверностью сведений, подлежащих внесению в Еди-

ный государственный реестр недвижимости (ЕГРН), поскольку именно пространственные данные зон формируют ограничения использования земельных участков и объектов капитального строительства (О государственной регистрации недвижимости : федеральный закон от 13.07.2015 № 218-ФЗ. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст: электронный).

Формирование границ ЗОУИТ осуществляется с применением различных методических подходов, отличающихся по степени нормативной проработки, уровню пространственной детализации и интеграции в государственные информационные системы. При

этом сохраняется проблема разрозненности сведений о правовом режиме зон, что связано с различиями в нормативных требованиях в части содержания ограничений использования объектов недвижимости.

Согласно пункту 6 статьи 10 Федерального закона № 218-ФЗ в реестр границ подлежат внесению сведения о содержании ограничений использования объектов недвижимости (О государственной регистрации недвижимости: федеральный закон от 13.07.2015 № 218-ФЗ. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст: электронный.). Однако приказом Росреестра № П/0292 предусматривается указание таких сведений «при необходимости», при этом конкретные критерии, обязывающие вносить данные сведения, на нормативном уровне не детализированы и четко не установлены (Об утверждении формы и состава сведений реестра границ Единого государственного реестра недвижимости: приказ

Росреестра от 15.12.2021 № П/0292. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст: электронный). В результате на практике сохраняется неоднородность подходов к описанию ограничений использования объектов недвижимости при внесении сведений о ЗОУИТ в ЕГРН.

Авторами проведён анализ сведений, содержащихся в строке «Иные характеристики объекта» раздела «Сведения об объекте» графических описаний местоположения границ ЗОУИТ. Результаты анализа показали отсутствие унифицированного подхода к представлению сведений об ограничениях использования объектов недвижимости (табл. 1). В ряде случаев сведения содержат прямое перечисление запрещённых видов деятельности, в других – ограничиваются ссылкой на нормативный правовой акт без конкретизации содержания ограничений, что в условиях цифрового взаимодействия делает информацию о зоне практически непригодной для автоматизированной обработки и однозначного толкования.

Таблица 1. Примеры заполнения строки «Иные характеристики объекта» раздела «Сведения об объекте» графического описания местоположения границ зон

Вид зоны	Сведения об объекте (иные характеристики объекта)
Лесопарковый зеленый пояс	1) использование токсичных химических препаратов, в том числе в целях охраны и защиты лесов, пестицидов, агрохимикатов, радиоактивных веществ; 2) размещение отходов производства и потребления I – III классов опасности; 3) размещение объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, отнесенных к объектам I категории; 4) создание объектов, не связанных с созданием объектов лесной инфраструктуры, для переработки древесины; 5) разработка месторождений полезных ископаемых, за исключением разработки месторождений минеральных вод и лечебных грязей, использования других природных лечебных ресурсов; 6) строительство животноводческих и птицеводческих комплексов и ферм, устройство навозохранилищ; 7) размещение скотомогильников; 8) размещение складов ядохимикатов и минеральных удобрений и пр.
Охранная зона «Кабельная линия электрообеспечения»	Постановление Правительства Российской Федерации № 160 от 24.02.2009 «О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон», пп. 8–11
Санитарно- защитная зона	Санитарно-защитная зона определена согласно проекту, ограничения использования объектов недвижимости в границах зоны определены: п. 5.1, п. 5.2 гл. V СанПиН 2.2.1./2.1. 1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»; п. 5 Постановление Правительства РФ от 3 марта 2018 г. № 222 «Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон»

В условиях высокой плотности застройки и развития сложной пространственной инфраструктуры, включающей сети подземных

(кабели, трубопроводы) и надземных (воздушные линии электропередачи, эстакады) коммуникаций, особую актуальность приоб-

ретаает необходимость объемного представления границ ЗОУИТ. Многие из таких зон (охранные зоны инженерных сетей) имеют не только проекцию на земную поверхность, но и строго регламентированные параметры по глубине или высоте. В связи с развитием Национальной системы пространственных данных (НСПД) необходимо предусмотреть не только обязательное наличие структурированных семантических сведений об ограничениях, но и переход к трехмерному формату ведения реестра границ, где пространственное положение ЗОУИТ описывается совокупностью координат (X, Y, H). Интеграция высотных характеристик в НСПД позволит обеспечить полноценный пространственный анализ при проектировании линейных объектов и подземных сооружений, исключая коллизии между смежными зонами и объектами недвижимости, расположенными на разных уровнях.

Методы и материалы

Анализ существующих классификаций [1, 2] свидетельствует о том, что в их основе лежит главным образом типология зон по правовым и функциональным признакам, в то время как вопросы методики определения и описания их пространственных границ

остаются недостаточно проработанными. В связи с этим авторами предложена систематизация факторов установления границ ЗОУИТ (табл. 2).

Таким образом, установление границ ЗОУИТ следует рассматривать как результат комплексного воздействия различных факторов. Предложенная систематизация позволяет структурировать преобладающие факторы формирования пространственных границ ЗОУИТ и создаёт основу для разработки методических подходов к их установлению, ориентированных на повышение точности, воспроизводимости и правовой определённости пространственных данных, подлежащих внесению в ЕГРН, однако не исключает существования уникальных случаев, требующих индивидуального подхода к установлению границ. Также развитие технологий пространственного моделирования ставит вопрос о необходимости перехода к трехмерному описанию границ ЗОУИТ, позволяющему отразить объемный характер ограничений. Переход к 3D-моделированию обеспечит корректное описание зон, чей правовой режим не ограничивается плоскостной проекцией, и создаст основу для автоматизированного контроля соблюдения высотных и глубинных регламентов при проектировании и строительстве.

Таблица 2. Систематизация факторов установления пространственных границ зон с особыми условиями использования территорий

Группа факторов	Содержание факторов	Характер влияния на формирование границ ЗОУИТ
Правовые	Вид ЗОУИТ; цели установления; способ закрепления границ	Определяют правовую модель формирования границ (нормативная, проектная, проектно-расчётная), уровень регламентации процедуры и степень юридической определённости пространственных параметров
Природно-территориальные	Рельеф местности; гидрологические и геологические условия; наличие опасных природных процессов	Формируют пространственную конфигурацию, протяжённость границ; являются определяющими для водоохраных зон, зон затопления и подтопления, санитарно-защитных зон
Градостроительные	Плотность и характер застройки; функциональное зонирование; наличие объектов капитального строительства и линейных сооружений	Обуславливают сложность пространственного моделирования границ, необходимость согласования с документами территориального планирования и ПЗЗ
Технические	Точность и методы определения координат характерных точек границ; применяемые геоинформационные технологии	Влияют на точность координатного описания, воспроизводимость результатов и соответствие нормативным требованиям, а также на возможность цифровой интеграции пространственных данных
Пространственно-информационные	Полнота и актуальность сведений ЕГРН; наличие координатного описания; соответствие форматов представления данных установленным требованиям; 3D-модели	Определяют корректность отражения границ в ЕГРН, уровень правовой определённости ограничений и вероятность возникновения реестровых ошибок

Выбор способа формирования пространственных границ ЗОУИТ осуществляется на основе анализа совокупности факторов установления границ и определяется видом зоны, целями её установления, условиями территории и требованиями нормативного регулирования. На основе анализа факторов выделены способы формирования границ (рис. 1).



Рис. 1. Способы формирования границ ЗОУИТ

Результаты

В целях выявления степени проработки процесса установления границ ЗОУИТ выполнен сравнительный анализ работ [3–11] (табл. 3).

Таблица 3. Сравнительный анализ методических элементов установления границ ЗОУИТ

Авторы, год	Элемент сравнения							
	Нормативный анализ	Технологическая схема	Координатная методика	Учет нормативной точности	ГИС	Внесение в ЕГРН	3D-модель	Универсальность
Аврунев Е. И., Губанищева М. А., Моисеева Н. А., 2025 [3]	+	+	+	+	+	+	-	-
Чилингер Л. Н., 2019 [4]	+	+	+	+	+	+	+	-
Чилингер Л. Н., Козина М. В., Аврунев Е. И., 2020 [5]	+	+	+	+	+	+	+	-
Калюжин В. А., Митрофанова Н. О., Норкин В. И., 2020 [6]	+	-	+	+	-	+	-	-
Норкин В. И., 2021 [7, 8]	+	+	+	+	-	+	-	-
Байков К. С., Гилёва Л. Н., Дубровский А. В., Лисицкий Д. В., Подрядчикова Е. Д., 2020 [9]	+	+	-	-	+	+	-	-
Дубровский А. В., Скоринская Е. А., 2021 [10]	+	+	-	+	-	-	-	-
Илюшина Т. В., Сизов А. П., Беленко В. В., 2021 [11]	-	-	-	-	+	-	-	-

В рамках сравнительного анализа методических подходов к установлению границ ЗОУИТ в качестве одного из критериев оценки рассматривается универсальность ме-

тода. Под универсальностью в данном случае понимается возможность применения методического подхода к различным видам ЗОУИТ. Анализ показал, что существующие

методические подходы, как правило, ориентированы на решение задач отдельных видов ЗОУИТ и учитывают специфику конкретных объектов, в связи с чем обладают ограниченной степенью универсальности.

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о несбалансированности существующих научных подходов. Большинство работ сосредоточено либо на нормативно-правовом анализе, либо на точности определения координат характерных точек, фиксирующих границы, либо на разработке технологической схемы для конкретного вида ЗОУИТ.

При этом отсутствует интегрированная модель, объединяющая:

- правовую формализацию содержания ограничений;
- технологическую последовательность установления границ;
- автоматизированную подготовку сведений для внесения в ЕГРН.

Предложенная систематизация факторов и анализ методических элементов формируют теоретическую основу для разработки информационной модели установления границ ЗОУИТ с учетом правовых и информационных требований (рис. 2).

Важным аспектом разработанной информационной модели является систематизация факторов установления границ ЗОУИТ с последующим выбором способа формирования границ на этапе принятия решения. Отдельного внимания, по мнению авторов, заслуживает вопрос точности установления границ зон как на местности, так и в виртуальном пространстве. На сегодняшний день предусмотрено, что координаты характерных точек границ ЗОУИТ определяются с точностью не ниже точности картографической основы ЕГРН наиболее крупного масштаба, созданной на территорию кадастрового квартала, в котором расположена граница (Об утверждении формы и состава сведений реестра границ Единого государственного реестра недвижимости : приказ Росреестра от 15.12.2021 № П/0292. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст: электронный). Это означает, что при использовании картометрического способа точность измерения координат напрямую зависит от мас-

штаба применяемого топографического плана или карты. При этом даже наличие картографической основы ЕГРН наиболее крупного масштаба (1 : 500) не гарантирует достижения нормативных показателей: точность определения координат характерных точек картометрическим способом для земель населенных пунктов, а также земель сельскохозяйственного назначения, предназначенных для ведения личного подсобного хозяйства, огородничества и садоводства, будет составлять от 0,25 до 0,6 м, что не соответствует установленным требованиям.

Не менее важно иметь полную информацию о пространственных данных с четким описанием правового режима, учитывающего ограничения ЗОУИТ. В условиях цифровизации процессов управления недвижимостью и перехода к автоматизированным системам принятия решений такой комплексный подход приобретает критическое значение. Формализованное представление ограничений в структурированном виде позволит обеспечить автоматическую проверку допустимости планируемого использования земельных участков и объектов капитального строительства, исключая необходимость обращения к нормативным документам в «ручном» режиме.

Особого внимания в контексте развития реестра границ заслуживает вопрос создания 3D-моделей ЗОУИТ. Необходимость перехода к объемному моделированию обусловлена наличием зон, ограничения в которых распространяются не на всю территорию, а действуют в определенных высотных пределах либо, напротив, начинают действовать с определенной высоты. К таким объектам относятся, например, приаэродромные территории, охранные зоны объектов электросетевого хозяйства, зоны охраны объектов культурного наследия, регулирующие высотность застройки. Двумерное (плоскостное) описание таких зон не позволяет в полной мере отразить специфику их правового режима и создает риски некорректной интерпретации ограничений при планировании строительства и реконструкции объектов капитального строительства.

В отличие от технологической схемы, отражающей последовательность выполнения работ, предложенная информационная модель описывает взаимосвязь пространственных, правовых и атрибутивных данных, участвующих в процессе установления границ ЗОУИТ. В ин-

формационной модели серым цветом выделены элементы, предлагаемые в рамках совершенствования существующего подхода к установлению границ ЗОУИТ. Субъектами, реализующими функции модели, выступают уполномоченный орган государственной власти или местного самоуправления (принятие решения о создании ЗОУИТ), кадастровый инженер (подготовка графического описания местоположения границ, включая координатное описание и семантическую информацию), орган регистрации прав (проверка и внесение сведений в ЕГРН).

Аналогичные проблемы отмечаются в исследованиях, посвящённых трёхмерному кадастру объектов недвижимости, где показано, что традиционные двумерные ка-

дастровые системы, основанные на проецировании границ объектов на плоскость земельного участка, не позволяют корректно учитывать их взаимное расположение на различных высотных уровнях, что обуславливает необходимость перехода к 3D-моделированию пространственных данных [12]. В научных работах также подчеркивается, что формирование трехмерных моделей объектов недвижимости требует разработки технологических схем сбора и обработки пространственных данных с использованием современных геодезических и фотограмметрических методов, обеспечивающих создание единой трехмерной базы городского пространства [13].

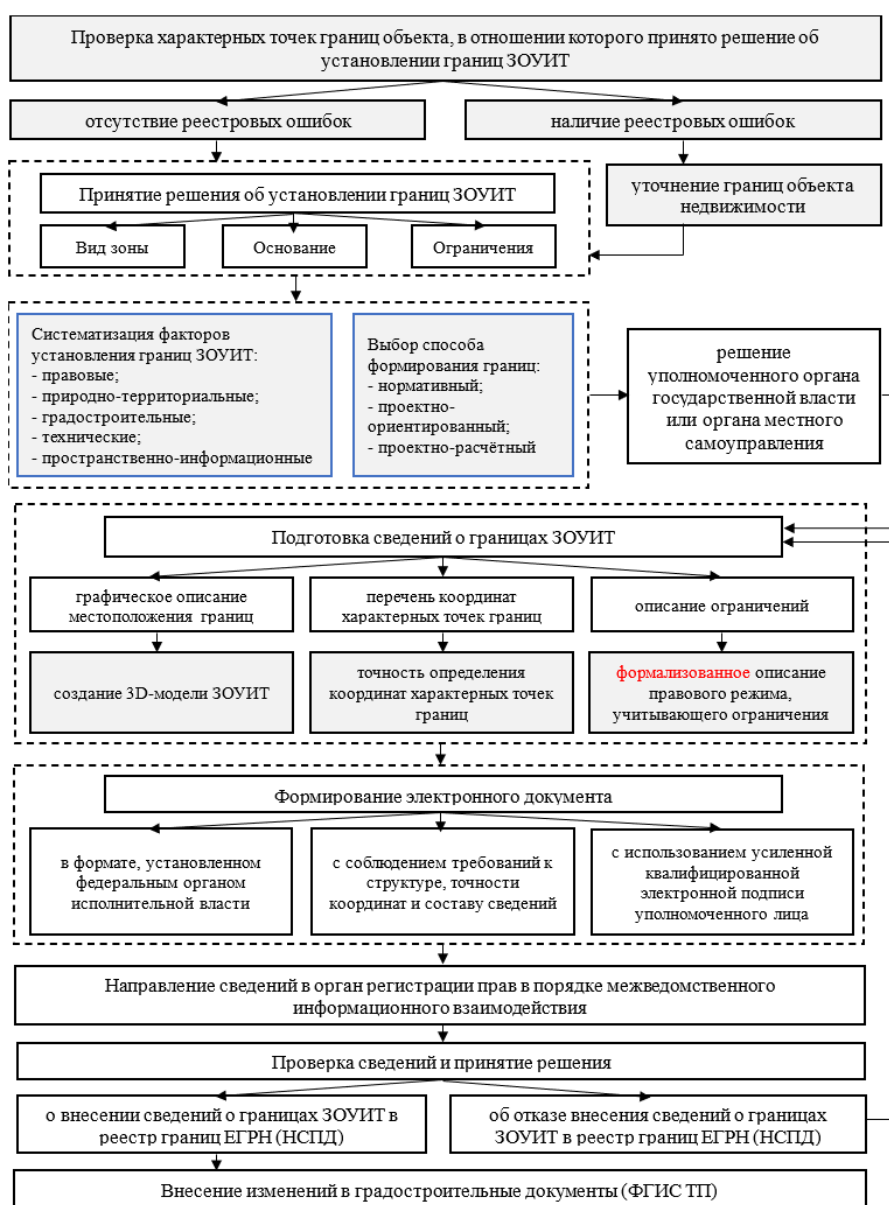


Рис. 2. Информационная модель установления границ ЗОУИТ

Вместе с тем существующие исследования ориентированы преимущественно на моделирование объектов недвижимости и городской инфраструктуры и практически не рассматривают вопросы трёхмерного пространственного описания зон с особыми условиями использования территорий. Это подтверждает необходимость разработки специализированной информационной модели 3D-представления границ ЗОУИТ и её интеграции в реестр границ.

Заключение

Установление пространственных границ ЗОУИТ является многоуровневым процессом, требующим комплексного учета различных факторов.

Проведенное исследование показывает, что эффективное функционирование реестра границ требует одновременного решения двух задач: обеспечения точности пространственных данных, которая при картометрическом способе не всегда достигает норматив-

ных значений даже при использовании наиболее крупномасштабной основы, и формализованного описания правового режима зон. Преодоление указанных противоречий возможно в рамках предложенной информационной модели установления границ ЗОУИТ, интегрирующей пространственную и семантическую составляющие в формате, пригодном для автоматизированной обработки.

Внедрение трехмерного моделирования ЗОУИТ в том числе открывает новые возможности для автоматизированного контроля соблюдения установленных ограничений. Формирование 3D-моделей позволит перейти от констатации факта вхождения земельного участка в границы зоны к анализу пространственного расположения объектов капитального строительства относительно объемных параметров зоны.

Предложенный подход позволяет повысить правовую определенность, снизить риски земельных споров и обеспечить цифровую воспроизводимость результатов установления границ ЗОУИТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пархоменко Д. В., Чернов А. В., Пархоменко И. В. Применение геоинформационных технологий для создания охранных зон пунктов государственной геодезической основы. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 4. С. 184–192. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-184-192. EDN SSVOSL.
2. Скатов М. А. Разработка классификации зон с особыми условиями использования территорий как фактора формирования рыночной и кадастровой стоимости земельных участков. Российский экономический интернет-журнал. 2023. № 4. EDN JQBMCY.
3. Аврунев Е. И., Губанищева М. А., Моисеева Н. А. Разработка технологической схемы установления границ приаэродромной территории. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2025. Т. 69, № 1. С. 115–126. DOI 10.30533/GiA-2025-007. EDN EWZVIA.
4. Чилингер Л. Н. Методический подход к установлению границ зон с особым водным режимом: обоснование и технологическая схема реализации. Вестник СГУГиТ 2019. Т. 24, № 3. С. 222–237. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-222-237. EDN QLNURG.
5. Чилингер Л. Н., Козина М. В., Аврунев Е. И. Технологическая схема установления границ водоохраных зон в местной системе координат для внесения в Единый государственный реестр недвижимости. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64, № 5. С. 576–583. DOI 10.30533/0536-101X-2020-64-5-576-583. EDN VFERRE.
6. Калюжин В. А., Митрофанова Н. О., Норкин В. И. Анализ правовых и технологических условий установления охранных зон линейных сооружений. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 1. С. 239–253. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-239-253. EDN CHOMNA.
7. Норкин, В. И. Исследование влияния динамических параметров координатного описания на точность определения площади зон с особыми условиями использования территорий

линейных объектов. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 2. С. 164–172. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-164-172. EDN WDKXRB.

8. Норкин В. И. Совершенствование методики установления границ зон с особыми условиями использования территорий линейных объектов : дис. ...канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. 133 с.

9. Байков К. С., Гилева Л. Н., Дубровский А. В. [и др.] Формирование границ территорий и установление охранных зон объектов культурного наследия. Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 4. С. 128–137. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-128-137. EDN FZPJIC.

10. Дубровский, А. В., Скоринская Е. А. Обзор российского опыта выполнения кадастровых работ по установлению границ зон затопления и подтопления. Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2021. № 3. С. 8-20. DOI 10.51885/1561-4212_2021_3_8. EDN PFXSIF.

11. Илюшина, Т. В., Сизов А. П., Беленко В. В. Использование ГИС MapInfo Professional для исчисления площадей зон затопления земель и средоформирующего потенциала территорий населенных пунктов. Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2021. Т. 5, № 1. С. 319–324. EDN TSERPA.

12. Чернов, А. В. Исследование вариантов построения 3D-модели объектов недвижимости для целей кадастра. Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 3. С. 192–210. EDN YAATKP.

13. Брылев, И. С., Бударова В. А., Елисеева Н. С. Опыт подготовки пространственных данных для решения задач трехмерного моделирования объектов недвижимости. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 3. С. 145–156. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-145-156. EDN YXWDTJ.

REFERENCES

1. Parkhomenko D. V., Chernov A. V., Parkhomenko I. V. (2020). Application of geoinformation technologies for creating protection zones of state geodetic network points. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 25, no. 4, pp. 184–192. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-184-192.

2. Skatov M. A. (2023). Development of classification of zones with special conditions of territory use as a factor of forming market and cadastral value of land plots. *Rossiyskiy ekonomicheskiy internet-zhurnal. [Russian Economic Online Journal]*, no. 4.

3. Avrunev E. I., Gubanishcheva M. A., Moiseeva N. A. (2025). Development of a technological scheme for establishing the boundaries of the aerodrome territory. *Izvestiya VUZov. Geodesy and Aerophotosurveying [Bulletin of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*, vol. 69, no. 1, pp. 115–126. DOI: 10.30533/GiA-2025-007.

4. Chilingher L. N. (2019). Methodological approach to establishing boundaries of zones with special water regime: justification and technological scheme. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 24, no. 3, pp. 222–237. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-222-237.

5. Chilingher L. N., Kozina M. V., Avrunev E. I. (2020). Technological scheme for establishing water-protection zone boundaries in a local coordinate system for entering into the Unified State Register of Real Estate. *Izvestiya VUZov. Geodesy and Aerophotosurveying [Bulletin of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*, vol. 64, no. 5, pp. 576–583. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-5-576-583.

6. Kalyuzhin V. A., Mitrofanova N. O., Norkin V. I. (2020). Analysis of legal and technological conditions for establishing protection zones of linear structures. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 25, no. 1, pp. 239–253. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-239-253.

7. Norkin V. I. (2021). Study of the influence of dynamic parameters of coordinate description on the accuracy of determining areas of zones with special conditions of territory use of linear objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 26, no. 2, pp. 164–172. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-164-172.

8. Norkin V. I. (2022). Improvement of methods for establishing boundaries of zones with special conditions of territory use of linear objects. Cand. Sci. (Tech.) dissertation. Novosibirsk,
9. Baikov K. S., Gileva L. N., Dubrovsky A. V., Lisitskiy D. V., Podryadchikova E. D. (2022). Formation of territory boundaries and establishment of protection zones of cultural heritage objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 27, no. 4, pp. 128–137. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-4-128-137.
10. Dubrovsky A. V., Skorinskaya E. A. (2021). Review of Russian experience in cadastral works for establishing flood and inundation zone boundaries. *Vestnik East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbayev [Bulletin of the D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University]*, no. 3, pp. 8–20. DOI: 10.51885/1561-4212-2021-3-8.
11. Ilyushina T. V., Sizov A. P., Belenko V. V. (2021). Using MapInfo Professional GIS to calculate areas of land-flooding zones and environmental potential of settlement territories. *Vysokoproduktivnyye vychislitel'nyye sistemy i tekhnologii, [High-Performance Computing Systems and Technologies]*, vol. 5, no. 1, pp. 319–324.
12. Chernov A.V. (2018). Study of options for constructing 3D models of real estate objects for cadastral purposes. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 23, no. 3, pp. 192–210. EDN YAATKP.
13. Brylev I. S., Budarova V. A., Eliseeva N. S. (2024). Experience in preparing spatial data for solving problems of three-dimensional modeling of real estate objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 29, no. 3, pp. 145–156. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-3-145-156. EDN YXWDTJ.

Об авторах

Алия Константиновна Ямилова – аспирант кафедры кадастра и территориального планирования СГУГиТ, ассистент кафедры геоинформатики и кадастра ТГАСУ.

Мария Александровна Губанищева – кандидат экономических наук, доцент кафедры геоинформатики и кадастра.

Евгений Ильич Аврунев – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования.

Владимир Владимирович Ознамец – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геодезии.

Author details

Aliya K. Yamilova – PhD Student, Department of Cadastre and Territorial Planning, Siberian State University of Geosystems and Technologies; Assistant Lecturer, Department of Geoinformatics and Cadastre, Tomsk State University of Architecture and Building.

Maria A. Gubanishcheva – PhD, Associate Professor, Department of Geoinformatics and Cadastre.

Evgeniy I. Avrunev – PhD, Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning.

Vladimir V. Oznamets – DSc., Associate Professor, Head of the Geodesy Department.

Получено / Received 02.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 10.06.2026

Принята к публикации / Accepted 17.07.2026