

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2>

ВЕСТНИК СГУГиТ

(Сибирского государственного университета геосистем и технологий)

Научный журнал

Том 31, № 2

2026

VESTNIK SSUGT

(Siberian State University of Geosystems and Technologies)

Scientific journal

Volume 31(2)

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	http://vestnik.ssga.ru
Контактные данные	E-mail: vestnik@ssga.ru Тел. (383)343-12-55
Распространение	Свободная цена.

Дата выхода в свет 29.04.2026. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 10,52. Тираж 100 экз. Заказ 65.

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 Александра Сергеевна – 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" – 43809᠑
Printing house	SSUGT Publishing and Printing Center 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108
Editors office and publisher address	10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108
Website	http://vestnik.ssga.ru
Contact details	E-mail: vestnik@ssga.ru Phone: +7(383)343-12-55
Distribution Terms	Offered at a free-market price

Issue data 29.04.2026. Format 60 × 84 1/8.
Conv. pr. sheets 10,52. Circulation 100 copies. Order 65.

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: Dehanova Elena Konstantinovna.

Computer Layout: Lesnykh Iana Anatolyevna.

Cover Design: Lesnykh Iana Anatolyevna.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

Васютинский И. Ю., Васютинская С. И., Дементьев Д. В. Результаты исследования нового турбулентного метода оценки рефракции в жаркую погоду 8

Жилинский Н. А., Дорогова И. Е. Позиционирование подвижных элементов строительной техники посредством компьютерного зрения 14

Косарев Н. С. Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму 22

Мареев А. В., Попков М. А., Янгальшев В. Р., Мамаев Д. С. Исследование точности прототипа малобюджетного цифрового датчика слежения за вертикальными смещениями на основе алгоритмов компьютерного зрения 33

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

Ильченко А. А. Выявление и классификация криогенных процессов по данным космической съемки 43

Слинкина О. А., Михайлов П. В., Демидко Д. А. Применение ГИС-технологий для оценки запасов углерода лесов, погибших от воздействия энтомовредителей 53

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Карин С. А. Методы сбора и актуализации многомерных данных для целей создания геоинформационной системы доступности городской инфраструктуры 63

Колесников А. А., Лисицкий Д. В., Пошивайло Я. Г., Янкелевич С. С. Методологические аспекты использования искусственного интеллекта в картографии 75

Кулыгин В. В., Парфенова А. В. Оценка изменений земельного покрова в бассейне Нижнего Дона 88

Полякова Я. Р., Сторожук Н. А. Картографирование социальной инфраструктуры города Перми 98

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

Аврунев Е. И., Гиниятов И. А., Гиниятов А. И. Предложения по проведению деформационной паспортизации объектов капитального строительства 106

Бабкенова Л. Т., Дубровский А. В., Унышева Н. К., Москвин В. Н. Мониторинг и оценка возможности появления эрозионных процессов на землях сельскохозяйственного назначения 115

Богданова О. В., Меркурьева К. Р. Оценка пространственного развития земель городской агломерации 126

Кубраков Д. В., Жигулина Т. Н. Пространственный анализ распределения величины внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости и прибыли предпринимателя на территории крупного города (на примере гаражной недвижимости) 137

Стрекаловская М. И., Добротворская Н. И. Методика информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда Республики Саха (Якутия) 147

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОЙ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Муренко Д. И. Советско-германская экспедиция на Памир 1928 г.: топографо-геодезические задачи и достижения 158

Ознамец В. В., Рязанцева М. В., Субочева А. О., Якушова Е. С. Формирование практико-ориентированной цифровой среды в университете для подготовки инженеров-геодезистов 169

Volume 31(2), 2026

CONTENTS

GEODESY AND MINING SURVEYING

<i>Vasyutinsky I. Yu., Vasyutinskaya S. I., Dementiev D.V.</i> Accuracy assessment of a novel turbulence-based refraction method under hot weather conditions	8
<i>Zhilinskiy N. A., Dorogova I. E.</i> Computer vision-based positioning of mobile construction equipment components	14
<i>Kosarev N. S.</i> Multipath Monitoring Technique Based on Carrier-to-Noise Density Ratio Analysis.....	22
<i>Mareev A. V., Popkov M. A., Yangalyshev V. R., Mamaev D. S.</i> Accuracy assessment of a lowcost digital sensor prototype for vertical displacement monitoring using computer vision algorithms.....	33

REMOTE SENSING OF THE EARTH AND PHOTOGRAMMETRY

<i>Ilchenko A. A.</i> Detection and classification of cryogenic processes from satellite remote sensing data.....	43
<i>Slinkina O. A., Mikhailov P. V., Demidko D. A.</i> GIS-based assessment of carbon stocks in forests devastated by insect pests.....	53

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

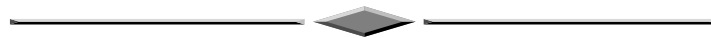
<i>Karin S. A.</i> A distributed actor network model for processing heterogeneous geospatial data using microservices.....	63
<i>Kolesnikov A. A., Lisitsky D. V., Poshivaylo Y. G., Yankelevich S. S.</i> Methodological dimensions of artificial intelligence applications in cartography	75
<i>Kulygin V. V., Parfenova A. V.</i> Assessment of land cover changes in the Lower Don river basin	88
<i>Polyakova Ya. R., Storozhuk N. A.</i> Mapping the social infrastructure of Perm city.....	98

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

<i>Avrunev E. I., Giniyatov I. A., Giniyatov A. I.</i> Guidelines for deformation monitoring and passportization of capital construction facilities.....	106
<i>Babkenova L. T., Dubrovsky A. V., Unysheva N. K., Moskvina V. N.</i> Monitoring and assessment of agricultural land erosion risk.....	115
<i>Bogdanova O. V., Merkurieva K. R.</i> Assessment of Urban Agglomeration Spatial Development.....	126
<i>Kubrakov D. V., Zhigulina T. N.</i> Spatial analysis of external (economic) obsolescence and entrepreneurial profit distribution in a large city (the case of garage property).....	137
<i>Strekalovskaya M. I., Dobrotvorskaya N. I.</i> Methodology for information support in planning the use of forest fund lands in the Republic of Sakha (Yakutia).....	147

METHODOLOGY OF RESEARCH AND EDUCATIONAL ACTIVITIES

<i>Murenko D. I.</i> The Soviet-German Pamir Expedition of 1928: topographic and geodetic objectives and accomplishments.....	158
<i>Oznamets V. V., Ryazantseva M. V., Subocheva A. O., Yakushova E. S.</i> Developing a practice-oriented digital environment at the university for training surveying engineers.....	169



УДК 528.061

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-8-13>

Результаты исследования нового турбулентного метода оценки рефракции в жаркую погоду

И. Ю. Васютинский¹, С. И. Васютинская¹, Д. В. Дементьев²✉

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

²ООО «ГиС», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: dementiev@yandex.ru

Аннотация. Одним из наиболее востребованных видов геодезических работ является тригонометрическое нивелирование. Однако во многих случаях из-за погодных условий периоды выполнения этого вида работ крайне ограничены. Особенно сложно выполнять тригонометрическое нивелирование в жаркую погоду, когда визирные цели из-за флуктуаций показателя преломления сильно размыты и их положение хаотически изменяется. В такие периоды сильно возрастают ошибки измерения зенитных расстояний, вызванных влиянием рефракции. По этой причине геодезические наблюдения рекомендуется выполнять только при благоприятных условиях, т. е. в ограниченные периоды времени (как правило, после восхода Солнца и перед его заходом). Целью данной работы является исследование точности нового турбулентного метода определения рефракции в самое неблагоприятное время наблюдений – в полдень в жаркий безоблачный день, т. е. в условиях, когда геодезические работы выполнять не рекомендуется.

Ключевые слова: атмосфера, рефракция, турбулентный метод определения рефракции, температурная стратификация, угол прихода, флуктуации показателя преломления воздуха, скважность

Для цитирования:

Васютинский И. Ю., Васютинская С. И., Дементьев Д. В. Результаты исследования нового турбулентного метода оценки рефракции в жаркую погоду. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 8–13. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-8-13>

Accuracy assessment of a novel turbulence-based refraction method under hot weather conditions

I. Yu. Vasyutinsky¹, S. I. Vasyutinskaya¹, D. V. Dementiev²✉

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

²GiS LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: dementiev@yandex.ru

Annotation: Trigonometric leveling ranks among the most sought-after geodetic survey techniques. Yet, adverse weather often severely restricts viable working periods. Hot weather poses particular challenges, as

fluctuations in the atmospheric refractive index blur sighting targets and induce chaotic positional shifts. This markedly amplifies zenith distance measurement errors due to refraction. Consequently, geodetic observations should be confined to favorable conditions, typically shortly after sunrise and before sunset. The study evaluates the accuracy of a novel turbulence-based refraction determination method under the most adverse conditions: midday on a hot, cloudless day, when such work is generally inadvisable.

Keywords: atmosphere, turbulence-based refraction determination method, temperature stratification, angle of arrival, fluctuations in the refractive index of air, borehole spacing

For citation:

Vasyutinsky I. Yu., Vasyutinskaya S. I., Dementiev D.V. (2026). Accuracy assessment of a novel turbulence-based refraction method under hot weather conditions. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 8–13. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-8-13>

Введение

Широко известно, что при выполнении тригонометрического нивелирования оптические измерения всегда рекомендуется выполнять в благоприятное для наблюдений время, т. е. при безразличной температурной стратификации атмосферы [1]. При выполнении работ в других условиях точность получаемых результатов из-за вертикальной рефракции значительно снижается, и поэтому они, как правило, могут быть использованы только для грубой оценки получаемых высот. Предложено много формул для определения вертикальной рефракции, в связи с чем в работе [2] отмечается: «Предложенных формул не меньше, чем формул поправок за рефракцию. Однако, задача учёта рефракции не нашла окончательного разрешения». В СССР обширные исследования вертикальной рефракции были проведены в ЦНИИГАИК и во Львовском политехническом институте. Как показывают исследования, точность определения рефракции большинством классических методов невысока – как правило, на один-два порядка ниже инструментальной точности используемого прибора.

Турбулентные методы определения рефракции

Турбулентные методы определения рефракции начали разрабатываться сравнительно недавно – с 70-х гг. прошлого столетия [3–6].

Это объясняется тем, что теория турбулентных методов определения рефракции базируется на классической теории рефракции, созданной Ньютоном и теории оптики турбулентной атмосферы, в создание которой внесли значительный вклад как отечественные, так и зарубежные учёные: О. Рейнольдс,

Д. И. Тейлор, Л. Ф. Ричардсон, А. М. Обухов, А. Н. Колмогоров, А. С. Монин, Л. А. Чернов, А. С. Гурвич, В. И. Миронов, М. В. Кабанов, В. В. Носов, В. Е. Зуев, В. А. Банах, В. И. Татарский, В. В. Покасов, А. М. Яглом и др.

Для получения информации о рефракции необходимо измерять искажения волны и определить зависимости между явлениями рефракции и искажениями световой волны.

От известных ранее способов турбулентные методы отличаются тем, что основаны на измерении и анализе параметров световой волны, прошедшей трассу в момент измерений [3–6].

Впервые экспериментальные исследования метода определения рефракции по флуктуациям угла прихода были выполнены в 70–80-х гг. прошлого века на геодинимическом полигоне Физико-технического института АН Туркменской ССР под Ашхабадом. При этом использовалось созданное для этой цели лазерное углоизмерительное устройство, которое автоматически измеряло направление на цель 50 раз в секунду с точностью 1".

Исследования проводились в разные сезоны года на трассах протяженностью 2,5 и 1,0 км.

С появлением роботизированных тахеометров процесс определения рефракции значительно упростился, так как эти приборы позволяют автоматически осуществлять наведение на визирную цель и выполнять регистрацию результатов наблюдений с высокой скоростью.

В данной статье на основе выполненных исследований рассматривается возможность использования этого метода в самых неблагоприятных условиях наблюдений.

Экспериментальная проверка турбулентного метода определения рефракции при неблагоприятных условиях наблюдений (при неустойчивой температурной стратификации) с помощью роботизированного тахео-

метра. В Москве была выбрана трасса протяженностью 572 м. Взятое за эталонное превышение между крайними точками было определено по программе геометрического нивелирования II класса. Тригонометрическое нивелирование между конечными точками трассы выполнялось роботизированным тахеометром с инструментальной точностью 1". Визирный луч проходил над асфальтированным тротуаром на высоте порядка 1,4 м.

Работа выполнялась в самое жаркое время солнечного дня с 10 до 16 час, когда геодезические наблюдения выполнять не рекомендуется. Температура воздуха составляла +27...+29 °С, ветер 2 м/с Ю-ЮВ, давление 754 мм рт. ст. В течение всего периода наблюдений визирная

цель хаотически колебалась и была расплывчатой, а её форма непрерывно менялась.

В качестве примера рассмотрим результаты измерений, проводимых практически непрерывно с 13 до 13 час 45 мин, со скважностью 5". Всего было выполнено 300 измерений.

Для каждого момента измерений, исходя из сравнений результатов тригонометрического и геометрического нивелирования, были получены значения углов рефракции r , принимаемые за эталонные.

Для расчета текущих значений вертикального угла рефракции r_d , полученного турбулентным методом, использовалась известная формула [6, 7]

$$r_d = r_n + r_{ан} = 8,13 L (0,000244 \frac{P}{T^2} \pm \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3} a(Ri)}). \quad (1)$$

Здесь $r_n = 8,13 L \cdot 0,000244 \frac{P}{T^2}$ – нормальная составляющая угла рефракции;

$r_{ан} = \pm \frac{8,13 \cdot L \cdot \bar{C}_n \cdot B(\lambda)}{h^{2/3} a(Ri)}$ – аномальная составляющая угла рефракции;

где L – длина трассы, в см; P – давление, в мбар; T – температура воздуха, в К; $B(\lambda)$ в мбар/град, зависит от длины волны λ [4]; \bar{C}_n – структурная характеристика поля показателя преломления в $см^{-1/3}$; h – эквивалентная высота трассы, в см; $a(Ri)$ – универсальная безразмерная функция, которая зависит от температурной стратификации атмосферы [8].

При неустойчивой температурной стратификации атмосферы преобладающее влияние оказывает аномальная составляющая угла рефракции $r_{ан}$, значение которой определяется в основном величиной \bar{C}_n

$$r_{ан} = 8,13L \frac{B(\lambda)\bar{C}_n}{h^{2/3} a(Ri)}. \quad (2)$$

Для определения структурной характеристики показателя преломления воздуха на трассе используется выражение [9]

$$\bar{C}_n = 0,30 \cdot \Delta_{\alpha(OTP)} \cdot \varphi(\alpha_R)^{-1/2} \cdot L^{-1/2} \cdot (2R)^{1/6}, \quad (3)$$

где $\Delta_{\alpha(OTP)}$ – угол прихода отражённой световой волны; L – длина трассы; R – радиус объектива

приемника; $\varphi(\alpha_R)$ – числовая функция, позволяющая определить дисперсию дрожания с учётом усредняющего действия приемного объекта и зависящая от длины трассы [10, 11].

Результаты измерений группировали в виде отдельных циклов, каждый из которых содержал 30 отсчётов зенитного расстояния при КЛ и 30 отсчётов при КП.

Данные определений угла рефракции турбулентным методом r_d и углы рефракции r , полученные с использованием результатов тригонометрического и геометрического нивелирования, которые принимались за эталонные, представлены на рис. 1 и 2 в виде графиков хода рефракции циклов измерений № 2 и № 10.

Графики рефракции для всех циклов наблюдений имеют хаотичный характер и совершенно не повторяются.



Рис. 1. Графики углов рефракции за период с 13 час 02 мин 10 с до 13 час 04 мин 35 с

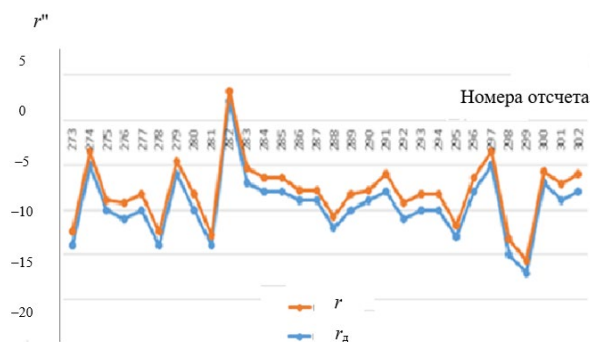


Рис. 2. Графики углов рефракции за период с 13 час 22 мин 45 сек до 13 час 25 мин 45 сек

Как видно на графиках, угол рефракции в жаркое время дня имеет в основном отрицательное значение, величина которого изменяется с большой частотой, а значения рефракции, принятые за эталонные и полученные турбулентным методом, практически совпадают и характеризуются средней квадратической ошибкой порядка 1,2".

Выполненный эксперимент подтверждает высокую точность определения рефракции динамическим методом в самых неблагоприятных условиях.

Эффект хаотического изменения величины рефракции наиболее сильно проявляется в жаркую погоду на более длинных трассах при отсутствии облачности и слабом ветре. При этом даже может возникнуть потеря видимости визирной цели.

Средняя квадратическая ошибка определения рефракции турбулентным методом r''_d , вычисленная на основании сравнения с «эталонными» значениями рефракции r'' в текущие моменты времени, составляет 1,2".

Это лишний раз подтверждает мудрость великого мыслителя древности – Гераклита Эфесского (IV век до н. э.), что «дважды нельзя войти в одну реку». Полученные результаты свидетельствуют о том, что если не измерить величину рефракции в текущее мгновение, то, по-видимому, ее значение больше никогда не получить, особенно в тех случаях, когда измерения рефракции выполняются не одновременно с выполняемыми оптическими наблюдения или в другом месте (на другой трассе или в другом районе).

В работе также приведены результаты исследований вертикальной рефракции турбулентным методом, на трассах несколько большей протяженности при неустойчивой температурной. Были получены точности, практически соответствующие инструментальной точности используемого прибора (1 ...2"), что соответствует результатам измерений, полученным в данной работе.

Следует отметить, что разработкой турбулентных методов определения рефракции занимаются и за рубежом. В частности, исследовалась зависимость между вертикальной рефракцией и искажениями изображения визирной цели, а также дрожанием изображения и флуктуациями интенсивности принимаемого сигнала. При этом использовались геодезические приборы с ПЗС и сцинтилляторы [12,13]. Однако указанные методы определения рефракции до настоящего времени не внедрены.

Трудности внедрения этих методов обусловлены тем, что не удалось установить функциональную связь между случайными искажениями световой волны и рефракцией.

Кроме того, необходимо вычислять сложно поддающиеся учёту многие параметры, характеризующие турбулентность атмосферы.

Сознавая перспективность турбулентных методов и понимая указанные трудности, в Институте геодезии и фотограмметрии (Швейцария) сделан вывод о необходимости продолжении исследований.

Заключение

1. Эксперименты по определению рефракции на трассах различной протяженности при неустойчивой температурной стратификации атмосферы подтверждают высокую точность турбулентного метода, практически соответствующую инструментальной точности роботизированного тахеометра. Временной ход рефракции имеет случайный характер и неповторим. Угол рефракции может иметь отрицательное, но реже положительное значение. Нельзя использовать постоянный коэффициент рефракции для введения поправок в результаты измерений.

2. Турбулентный метод определения и учета величины и знака значения рефракции с использованием роботизированных тахеометров расширяет возможности тахеометрического нивелирования.

3. Турбулентный метод позволяет исключить влияние вертикальной рефракции на результаты измерений на расстояниях до 800 м, что связано с ограниченной дальностью дей-

ствия используемых приборов, а также значительно увеличить диапазон рабочего времени даже при неблагоприятных условиях наблюдений без снижения точности результатов измерений.

4. Турбулентный метод прост в реализации и не требует какой-либо доработки серийно выпускаемых электронных тахеометров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Struwe W. Beschreibung der zur Ermittlung des Hohenschiedes dem schwarzenund dem Caspischen. Meere ausgeführten Messungen. СПб., 1849. 408 p.

2. Островская С. А. Учёт вертикальной рефракции на основании взаимных наблюдений и эквивалентных высот луча. Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1983. № 3. С. 51–60.

3. Дементьев В. Е. Об определении вертикальной рефракции. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1973. № 5. С. 29–31.

4. Дементьев В. Е. Рефракция и миражи. М. : Галлея. Принт, 2009. С. 391.

5. Дементьев В. Е. Определение вертикальной рефракции по флуктуациям угла прихода светового пучка. Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 4. С. 786–796.

6. Савиных В. П., Васютинский И. Ю., Дементьев Д. В. Обзоры актуальных проблем. Вертикальная рефракция света в приземном слое атмосферы: традиционные проблемы определения рефракции и новые технические достижения. Успехи физических наук РАН. 2022. Т. 192. № 8. С. 926–943.

7. Дементьев В. Е., Васютинский И. Ю., Дементьев Д. В. Современное состояние проблемы определения вертикальной рефракции в приземном слое атмосферы. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. № 1. С. 20–29.

8. Гурвич А. С., Кон А. С., Миронов В. И., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М. : Наука, 1976. 278 с.

9. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1981. 286 с.

10. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М. : Наука, 1967. 548 с.

11. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. 270 с.

12. Troller M., Szintillometrie zur Refraktionskorrektur von Tachymetermessungen. VPK 2001. 9. p. 603–607.

13. Weiss A. Determination of thermal stratification and turbulence of the atmospheric surface layer over various types of terrain by optical scintillometry. Dissertation ETH Zürich. 2002.

REFERENCES

1. Struve V. (1849). The struggle for the preservation of historical and art monuments in Schwarzenegger and the Caspian Sea. *St. Petersburg*. 408 P

2. Ostrovskaya S. A. (1983). Accounting for vertical refraction based on mutual observations and equivalent beam heights. *Geodeziya, kartografiya i aerofotos'yemka [Geodesy, cartography and aerial photography]*. No. 3. pp. 51–60 [in Russian].

3. Dementiev V. E. (1973). On the definition of vertical refraction. *Izv. VUZov. «Geodeziya i aerofotos'yemka» [Izv. VUZov. "Geography and aerial photography"]*. No. 5. pp. 29–31.

4. Dementyev V. E. (2009). *Refraktsiya i mirazhi [Refraction and mirages]*. Moscow : Halley Print. P. 391 [in Russian].

5. Dementiev V. E. (1982). Determination of vertical refraction by fluctuations in the angle of arrival of a light beam. *Kvantovaya elektronika [Quantum electronics]*. Vol. 9. No. 4. pp. 786–796 [in Russian].

6. Savinykh V. P., Vasyutinsky I. Yu., Dementyev D. V. (2022). Reviews of current problems. Vertical refraction of light in the surface layer of the atmosphere: traditional problems of determining refraction and new technical achievements. *Uspekhi fizicheskikh nauk RAN [Successes of Physical Sciences of the Russian Academy of Sciences]*. Vol. 192, No. 8. pp. 926–943 [in Russian].

7. Dementyev V. E., Vasyutinskiy I. Yu., Dementyev D. V. (2021). The current state of the problem of determining vertical refraction in the surface layer of the atmosphere. *Izv. VUZov. «Geodeziya i aerofotos"yemka» [Izv. VUZov. "Geography and aerial photography"]*. No. 1. pp. 20–29 [in Russian].

8. Gurvich A. S., Kon A. S., Mironov V. I., Khmelevtsov S. S. (1976). *Lazernoye izlucheniye v turbulentnoy atmosphere [Laser radiation in a turbulent atmosphere]*. Moscow : Nauka. 278 p. [in Russian].

9. Mironov V. L. (1981). *Rasprostraneniye lazernogo puchka v turbulentnoy atmosphere [Propagation of a laser beam in a turbulent atmosphere]*. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 286 p. [in Russian].

10. Tatarsky V. I. (1967). *Rasprostraneniye voln v turbulentnoy atmosphere [Wave propagation in a turbulent atmosphere]*. Moscow : Nauka. 548 p. [in Russian].

11. Zuev V. E., Banakh V. A., Pokasov V. V. (1983). *Optika turbulentnoy atmosfery [Optics of the turbulent atmosphere]*. L. : Gidrometeoizdat. 270 p. [in Russian].

12. Troller M. (2001). Syntillometry for correcting tachymetry parameters. *VPK* 9. pp. 603–607/

13. Weiss A. (2002) Determination of thermal stratification and turbulence of the surface layer of the atmosphere over various types of terrain by optical scintillometry. *Dissertation in Zurich*.

Об авторах

Игорь Юрьевич Васютинский – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии.

Станислава Игоревна Васютинская – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики.

Дементьев Дмитрий Викторович – инженер ООО «Геодезия и строительство» (ГИС).

Author details

Igor Yu. Vasyutinsky – D.Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy.

Stanislava I. Vasyutinskaya – PhD, Associate Professor, Department of Economics.

Dementyev D. Viktorovich – Engineer of Geodesy and Construction.

Получено / Received 05.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.09.2025

Принята к публикации / Accepted 15.10.2025

УДК [528.48:624]:004.8

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-14-21>

Позиционирование подвижных элементов строительной техники посредством компьютерного зрения

Н. А. Жилинский^{1✉}, И. Е. Дорогова¹

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

e-mail: nik.zil@yandex.ru

Аннотация. На примере автогрейдера рассмотрен альтернативный подход к задаче позиционирования подвижных узлов строительной техники, направленный на снижение зависимости стабильной работы системы позиционирования от износа и отказов физических датчиков под воздействием вибрации, пыли и механических нагрузок. Целью работы является разработка способов определения трёхмерных координат крайних точек отвала без непосредственного монтажа сенсоров на рабочий орган. Предложен программно-аппаратный комплекс на базе стереокамеры и визирных маркеров: алгоритм SIFT выполняет сопоставление ключевых точек стереопар, нейросеть YOLO – сегментацию области маркеров на снимках, а навигационные и инерциальные данные – преобразование локальных 3D-координат в глобальную систему координат. Представлен пошаговый алгоритм расчета целевых координат крайних отметок лезвия отвала автогрейдера. Предварительное моделирование и расчёты подтверждают возможность применения альтернативных подходов позиционирования подвижных узлов строительной техники посредством компьютерного зрения.

Ключевые слова: ГНСС-позиционирование, навигация, строительная техника, автогрейдер, компьютерное зрение, искусственный интеллект, стереокамера, системы нивелирования строительной техникой, позиционирование рабочего органа

Для цитирования:

Жилинский Н. А., Дорогова И. Е., Позиционирование подвижных элементов строительной техники посредством компьютерного зрения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 14–21. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-14-21>

Computer vision-based positioning of mobile construction equipment components

N. A. Zhilinskiy^{1✉}, I. E. Dorogova¹

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

e-mail: nik.zil@yandex.ru

Abstract. The study presents an alternative approach to positioning the mobile nodes of construction machinery, exemplified by a motor grader, aimed at reducing the system's reliance on physical sensors, which are prone to wear and failure under vibration, dust, and mechanical loads. The objective of the work is to develop methods for determining the 3D coordinates of the blade's extreme points without direct sensor mounting on the working node. A software-hardware solution based on a stereo camera and sight markers is proposed: the SIFT algorithm matches key points in the stereo pair; the YOLO neural network segments marker regions in images; navigation and inertial data transform local 3D coordinates into a global reference frame. A step-by-step algorithm for calculating the target coordinates of the grader blade's extreme marks is described. Preliminary simulations and

calculations confirm the feasibility of computer vision-based alternatives for positioning mobile nodes in construction machinery.

Keywords: GNSS positioning, navigation, construction machinery, motor grader, computer vision, artificial intelligence, stereo camera, construction-machinery leveling systems, positioning of working equipment

For citation:

Zhilinskiy N. A., Dorogova I. E. (2026). Computer vision-based positioning of mobile construction equipment components. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 14–21. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-2-14-21>

Введение

Для обеспечения современных высоких стандартов при строительстве все чаще используют системы нивелирования строительной техники, которые требуют высокой точности определения положения подвижных элементов техники, таких, как лезвие отвала грейдера или бульдозера [1]. Точное позиционирование этих элементов в пространстве позволяет повысить эффективность земляных работ, минимизировать строительные ошибки и обеспечить безопасность на строительной площадке. Однако существующие способы определения положения рабочего органа связаны с использованием датчиков, размещенных на частях техники, которые подвержены вибрации и механическому воздействию [2]. Это снижает надежность и долговечность датчиков.

На данный момент преимущественно используются датчики угла наклона, устанавливаемые непосредственно на рабочем органе, как описано в работах [3, 4]. Данный способ, хотя и обеспечивает приемлемую точность, имеет недостатки, связанные с воздействием вибраций, пыли и других внешних факторов на датчики. Поэтому существует необходимость частого обслуживания и калибровки датчиков. В качестве альтернативы в настоящей статье предлагается способ позиционирования подвижных элементов строительной техники с использованием компьютерного зрения [5], основанная на применении стереокамеры и маркеров, размещенных на том же подвижном элементе рабочего органа, что и целевые точки позиционирования.

Предлагаемый подход исключает необходимость установки датчиков на рабочем органе, что повышает надежность системы за счет уменьшения внешних воздействий. Использование стереокамеры позволяет опреде-

лить трехмерные координаты маркеров в локальной системе координат с последующим преобразованием в глобальную систему (например, WGS-84), что обеспечивает высокую точность позиционирования.

Целью данной статьи является разработка и описание способа позиционирования левого и правого краев лезвия отвала автогрейдера с использованием компьютерного зрения. В работе рассматриваются предложения по использованию описываемого способа, алгоритмы обработки изображений и математическое обеспечение, позволяющие достичь поставленной цели. Особое внимание уделяется сравнению предлагаемого подхода с существующими решениями и анализу его преимуществ и ограничений.

**Существующие способы
позиционирования рабочих органов
строительной техники**

Задача позиционирования подвижных элементов строительной техники активно обсуждается в научной и инженерной литературе [6, 7, 8, 9, 10], поскольку она напрямую связана с повышением производительности и автоматизации строительных процессов. Традиционные способы, основанные на использовании датчиков, установленных на рабочем органе, описаны в ряде работ, включая [3]. В статье [2] описывается система позиционирования ковша экскаватора, основанная на применении датчиков угла наклона, а также, при необходимости, тросовом энкодере. Однако такие решения имеют ограничения, связанные с воздействием вибрации и механических нагрузок, что снижает их надежность и требует технического обслуживания, а также частой замены датчиков. В связи с тем, что данный подход является общепринятым, он используется как в отечественных системах позиционирования подвижных узлов техники [11, 12], так и в зарубежных [13, 14, 15].

Альтернативные подходы, использующие технологии компьютерного зрения, становятся все более популярными благодаря развитию вычислительных систем и алгоритмов обработки изображений. Например, в работе [16] рассматривается применение компьютерного зрения, посредством видеogramметрической установки, для определения положения координат кузова, относительно визирных маяков на местности с известными координатами, согласно принципиальной схеме размещения визирных целей на строительном участке (рис. 1).

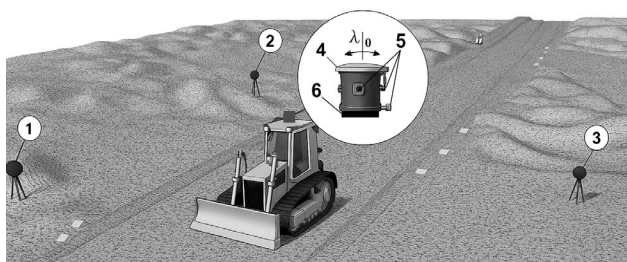


Рис. 1. Принципиальная схема размещения визирных целей на строительном участке:

- 1, 2, 3 – визирные цели; 4 – видеogramметрическая система; 5 – видеокамера; 6 – трегер

Предлагаемый способ позиционирования

Ключевыми технологиями для реализации предлагаемого подхода являются алгоритмы сопоставления изображений (image matching) при определении облака точек и сегментации объектов. В работе [17] описаны способы сопоставления изображений на основе алгоритма SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [18], которые позволяют эффективно определять ключевые точки на стереопаре. Для сегментации маркеров активно применяются нейросетевые модели, такие как YOLO (You Only Look Once), описанные в [19], которые обеспечивают высокую скорость и точность обнаружения объектов в реальном времени. Кроме того, для преобразования координат в глобальную систему координат (WGS-84) используются данные инерциальных измерительных модулей (IMU) и ГНСС-модуля.

Предлагаемый в данной статье способ сочетает преимущества стереокамер, нейросетевой сегментации и точной навигации, устраняя недостатки подходов, основанных на использовании физических датчиков, устанавли-

ваемых на рабочем органе. В отличие от способа, описанного в [3, 16], предлагаемый подход минимизирует количество датчиков, подверженных внешним воздействиям, а также обеспечивает высокую точность за счет использования компьютерного зрения, в совокупности с промышленным оборудованием.

Для реализации предлагаемого способа рассматривается состав оборудования, архитектура взаимодействия которого представлена на рис. 2.

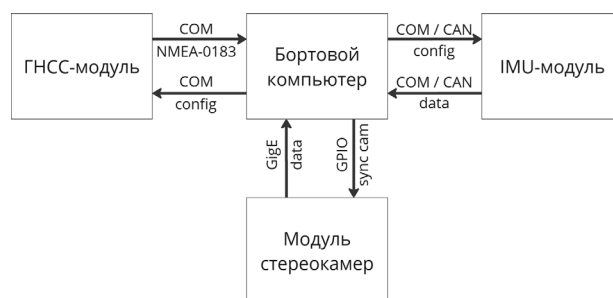


Рис. 2. Архитектура аппаратных модулей

Также предлагается определенная схема установки оборудования на автогрейдер (рис. 3).

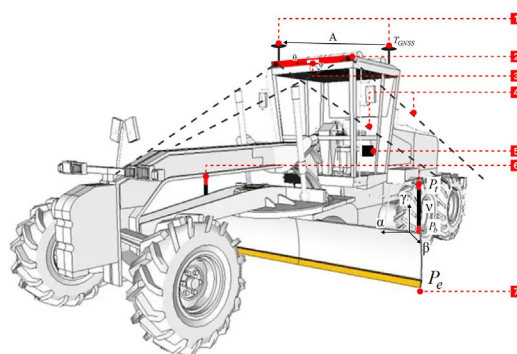


Рис. 3. Схема установки оборудования на автогрейдер:

- 1 – ГНСС-антенны; 2 – стереокамера; 3 – угол обзора стереокамеры; 4 – инерциальный модуль; 5 – бортовой компьютер; 6 – визирные маркеры; 7 – целевая точка позиционирования (кромка отвала)

Для работы программного комплекса необходим соответствующий набор исходных данных:

- параметры калибровки инерциального модуля;
- приращения координат маркеров до краев отвала;
- параметры калибровки стереокамеры (для исключения искажений при съемке);

- координаты техники, получаемые с помощью ГНСС-модуля;
- стереопара снимков с камеры;
- положение камер в пространстве.

Блок-схема алгоритма работы рассматриваемого программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 4.

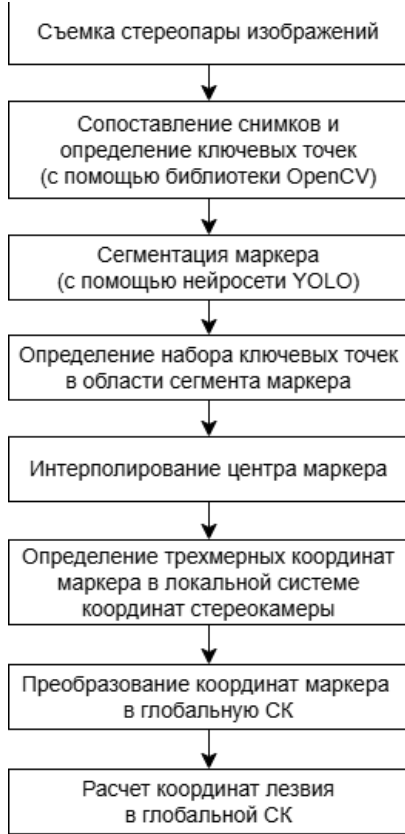


Рис. 4. Блок-схема алгоритма

Алгоритм расчета координат кромки отвала состоит из описанных ниже действий:

Сопоставляем стереопары по алгоритму SIFT [18] и получаем ключевые точки маркеров, верхней $x_{l,t}, y_{l,t}, x_{r,t}, y_{r,t}$ и нижней $x_{l,b}, y_{l,b}, x_{r,b}, y_{r,b}$ границы обоих снимков.

Вычисляем диспаратности [20] нижнего d_b и верхнего d_t края маркера:

$$d_b = x_{l,b} - x_{r,b}; \quad (1)$$

$$d_t = x_{l,t} - x_{r,t}. \quad (2)$$

Определяем глубины точек нижнего Z_b и верхнего Z_t края маркера, ориентируясь на фокусное f и базовое B расстояния:

$$Z_b = \frac{f * B}{d_b}; \quad (3)$$

$$Z_t = \frac{f * B}{d_t}. \quad (4)$$

При известной внутренней калибровке камеры (матрице K), реконструируем точки с трехмерными координатами в локальной системе координат для верхнего P_t и нижнего P_b края маркера:

$$P_b = Z_b K^{-1} \begin{pmatrix} x_{l,b} \\ y_{l,b} \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$P_t = Z_t K^{-1} \begin{pmatrix} x_{l,t} \\ y_{l,t} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Находим вектор оси маркера v :

$$v = P_t - P_b = (v_x, v_y, v_z). \quad (7)$$

Определяем крен маркера α вокруг оси X , для однозначного определения угла в диапазоне $[-\pi; \pi]$ использовалась функция $\arctan 2(y, x)$, учитывающая знаки обоих аргументов:

$$\alpha = \arctan 2(v_x, v_y). \quad (8)$$

Определяем тангаж маркера β вокруг оси Y :

$$\beta = \arctan 2(v_x, v_z). \quad (9)$$

Для дальнейшего расчета значения угла рысканья маркера γ определяем горизонтальный вектор по двум маркерам L и R , на одном уровне:

$$h = R - L = (h_x, h_y, 0). \quad (10)$$

Определяем рысканье маркера γ вокруг оси Z

$$\gamma = \arctan 2(h_x, h_y). \quad (11)$$

Составляем матрицы поворота маркера, по полученным углам тангажа $R_x(\alpha)$, крена $R_y(\beta)$ и рысканья $R_z(\gamma)$:

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Общая наклонная матрица R_m определяется формулой:

$$R_m = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma). \quad (15)$$

Рассчитываем координаты кромки отвала с учетом наклона маркера $P_e^{\text{лок}}$, в локальной системе координат техники:

$$P_e^{\text{лок}} = P_b + R_m \Delta, \quad (16)$$

где $\Delta = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ – фиксированная величина смещения маркера, относительно кромки отвала, м.

$$\sigma_Z^2 = \left(-\frac{fB}{d^2} \sigma_d \right)^2 + \left(\frac{B}{d} \sigma_f \right)^2 + \left(\frac{f}{d} \sigma_B \right)^2 = 0,0171^2, \quad (19)$$

где σ_Z – погрешность глубины, м;
 $f = 800$ – фокусное расстояние, пиксель;
 $B = 0,2$ – базового расстояния между камерами, м;
 $d = 58$ – диспаратность, пиксель;
 $\sigma_d = 0,2$ – погрешность диспаратности, пиксель;
 $\sigma_f = 1$ – погрешность фокусного расстояния, пиксель;
 $\sigma_B = 0,001$ – погрешность определения базового расстояния между камерами, м.

Далее определим точность определения ориентирования маркера в пространстве:

$$\sigma_m^2 = (\|\Delta\| \sigma_{\angle})^2 = 0,0049^2, \quad (20)$$

где σ_m – погрешность ориентирования маркера в пространстве, м;

Рассчитываем координаты кромки отвала с учетом наклона маркера, в глобальной системе координат:

$$P_e^{\text{глоб}} = P_e^{\text{лок}} R_{\text{кам}} + T_{GNSS}, \quad (17)$$

где T_{GNSS} – глобальные координаты, получаемые из навигационного модуля, м, $R_{\text{кам}}$ – матрица поворота камеры, на основе данных с инерциального модуля:

$$R_{\text{кам}} = R_x(\varphi)R_y(\theta)R_z(A), \quad (18)$$

где $R_x(\varphi)$ – матрица поворота камеры по полученному углу тангажа с инерциального модуля;

$R_y(\theta)$ – матрица поворота камеры по полученному углу крена с инерциального модуля;

$R_z(A)$ – матрица поворота камеры по полученному углу азимута техники с навигационного модуля.

По результатам расчета получаем координаты кромки отвала в глобальной системе координат WGS-84.

Результаты

Оценим точность определения вычисляемых значения, начиная с погрешности глубины:

$\Delta = 0,2$ – фиксированная величина смещения маркера, относительно кромки отвала, м;
 $\sigma_{\angle} = 0,0246$ – суммарная угловая погрешность маркера, рад.

В результате определяем погрешность вычисляемых координат кромки отвала, учитывая три независимых источника ошибок:

$$\sigma_{P_e^{\text{глоб}}}^2 = \sigma_Z^2 + \sigma_m^2 + \sigma_{T_{GNSS}}^2 \approx 0,0204^2, \quad (21)$$

где $\sigma_{P_e^{\text{глоб}}}$ – погрешность вычисляемых координат кромки отвала, м;

$\sigma_{T_{GNSS}} = 0,01$ – погрешность определения координат навигационным модулем в режиме RTK (в зависимости от условий может колебаться от 0,01 до 0,04), м.

Исходя из результатов, можно сделать вывод о том, что получаемая точность определения координат подвижных узлов строительной техники посредством компьютерного

зрения сопоставима с точностью позиционирования, величина которых составляет ± 2 см по высоте, достигаемой общепринятыми способами позиционирования [11, 12, 13, 14, 15], при которых применяется установка датчиков непосредственно на подвижный рабочий орган строительной техники.

Обсуждение

Описанный модуль позиционирования является частью комплекса многих систем нивелирования строительной техники, таких как [10, 11, 12, 13, 14].

В сравнении со стандартным подходом позиционирования подвижных узлов строительной техники, при непосредственной установке датчиков на рабочий орган, применение компьютерного зрения имеет соизмеримые показатели: точности позиционирования; частоты расчета целевых координат; себестоимости оборудования; доступности технологий, необходимых для комплексной реализации предлагаемого способа (в связи с использованием открытого программного обеспечения).

Применение компьютерного зрения может иметь определенные ограничения для работы, такие как наличие слепых зон, при отслеживании визирных маркеров, требования к освещенности, погодные условия и т. д. Данные ограничения могут быть минимизированы в пределах радиуса работы техники посредством разработки требований к установке оборудования на технике, эксплуатации программно-аппаратного комплекса и его периодического обслуживания.

Необходимо дополнительно подчеркнуть, что применение компьютерного зрения также позволяет обеспечить реализацию дополни-

тельных функций системы, таких, например, как предотвращение столкновений с объектами, без необходимости применения дополнительных аппаратных модулей.

Заключение

В статье описаны преимущества альтернативного подхода к позиционированию крайних точек отвала автогрейдера, способ позволяет исключить необходимость монтажа физических датчиков на рабочий орган автогрейдера, что минимизирует проблемы износа и отказов датчиков под воздействием вибрации, пыли и механических нагрузок. Предложенный программно-аппаратный комплекс на базе стереокамеры, визирных маркеров и навигационно-инерциальных данных обеспечивает возможность получения точных локальных 3D-координат и их преобразования в глобальную систему координат без применения дополнительных датчиков угла наклона, а также энкодеров, опционально. Представленный пошаговый математический алгоритм вычислений, от сопоставления ключевых точек способом SIFT и сегментации нейросетью YOLO до построения матриц поворота и расчёта итоговых координат, обеспечивает получение трехмерных координат целевых точек и упрощает сопровождение системы. Предварительные расчеты и моделирование подтвердили работоспособность предложенного решения и снижение уязвимости системы позиционирования. Дальнейшие исследования будут посвящены экспериментальной валидации способа в полевых условиях, адаптации алгоритмов компьютерного зрения к изменяющейся освещенности и внедрению автоматизированного контроля качества съёмки для повышения надёжности системы нивелирования строительной техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демиденко А. И., Летопольский А. Б., Семкин Д. С. Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2016. 393 с. EDN WDXYJD.
2. Ghassemi F., Tafazoli S., Lawrence P. D., Hashtrudi-Zaad K. An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, 11–15 May 2002. 2002. Vol. 2. P. 1771–1776.
3. Sun D., Ji C., Jang S., Lee S., No J., Han C., Han J., Kang M. Analysis of the Position Recognition of the Bucket Tip According to the Motion Measurement Method of Excavator Boom, Stick and Bucket. Sensors. 2020. № 20. P. 2881. DOI 10.3390/s20102881.
4. Haga M., Watanabe H., Fujishima K. Digging control system for hydraulic excavator. Mechatronics. 2001. № 11. P. 665–676. DOI: 10.1016/S0957-4158(00)00043-X.
5. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение : учебное пособие. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с. EDN: NEWUVN.

6. Марковнина А. И., Кривов А. В., Макаров В. С., Беляков В. В. Системы позиционирования для экскаваторной техники. Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2020. № 1. С. 37–46.
7. Хвалев П. С., Сатюков А. Б., Орехов С. А. Информационные технологии автоматического нивелирования в дорожно-строительной технике. Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2017. № 31-05. С. 11–15. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-11.
8. Букреев И. А. Комбинация достоинств 3D-системы управления техникой. Строительная техника и технологии. 2010. № 6. С. 54–56.
9. Букреев И. А. Взгляд изнутри. Современные системы автоматического нивелирования для строительных машин. Строительная техника и технологии. 2011. № 8. С. 78–81.
10. Кнышов А. В., Колесниченко И. Е., Ничипров А. А. Системы управления строительной техникой. Современные прикладные исследования : материалы третьей национальной научно-практической конференции, Шахты, 16–19 апреля 2019 года. Шахты: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2019. С. 25–27. EDN: LPOWWZ.
11. Hem-Nav. URL: <https://hem-nav.ru/resheniya> (дата обращения: 19.05.2025).
12. Cube-3D. URL: <https://cube-3d.ru/> (дата обращения: 19.05.2025).
13. Trimble Heavy Industry – Machine Control. URL: <https://heavyindustry.trimble.com/en/products/civil-construction/machine-control> (дата обращения: 19.05.2025).
14. FJDynamics. URL: <https://www.fjdynamics.com/> (дата обращения: 19.05.2025).
15. Topcon Earthmoving Solutions. URL: <https://www.topconpositioning.com/gb/en/solutions/infrastructure/earthmoving> (дата обращения: 19.05.2025).
16. Рощин Д. А. Применение системы машинного зрения для контроля пространственного положения строительной техники. Измерительная техника. 2022. № 3. С. 29–35. DOI 10.32446/0368-1025. EDN JZXKBN.
17. Гук А. П., Арбузов С. А. Исследование точности автоматического измерения координат точек снимков с помощью масштабно-инвариантного преобразования SIFT. ГЕО-Сибирь-2010. VI Международный научный конгресс : сборник материалов в 6 томах (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 года). Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. С. 35–38. EDN PFOMFD.
18. Лопатин Д. В. Анализ дескриптора особых точек изображений SIFT. Молодежь. Наука. Общество – 2021 : сборник студенческих работ Всероссийской студенческой научно-практической междисциплинарной конференции, Тольятти, 20–24 декабря 2021 года / отв. за выпуск С. Х. Петерайтис. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. С. 221–224. EDN YLEUPG.
19. Ultralytics GitHub Repository. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 19.05.2025).
20. Волкович А. Н. Комбинированный метод вычисления значения диспаратности на стереоизображениях в задачах стереодальнометрии. Информационные технологии и нанотехнологии. 2017. С. 720–726. EDN YQLPPD.

REFERENCES

1. Demidenko A. I., Letopolsky A. B., Semkin D. S. (2016). *Dorozhnye, stroitel'nye i pod'emno-transportnye mashiny: uchebnoe posobie [Road, Construction, and Lifting-Transport Machines: Textbook]*. Omsk: SibADI. 393 p. EDN: WDXYJD. [in Russian].
2. Ghassemi F., Tafazoli S., Lawrence P. D., Hashtrudi-Zaad K. (2002). An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, 11–15 May 2002*. Vol. 2. P. 1771–1776.
3. Sun D., Ji C., Jang S., Lee S., No J., Han C., Han J., Kang M. (2020). Analysis of the position recognition of the bucket tip according to the motion measurement method of excavator boom, stick and bucket. *Sensors*, 20, 2881. DOI: 10.3390/s20102881.
4. Haga M., Watanabe H., Fujishima K. Digging control system for hydraulic excavator. *Mechatronics*. 2001. № 11. P. 665–676. DOI 10.1016/S0957-4158(00)00043-X.
5. Shapiro L., Stockman G. (2006). *Komp'yuternoe zrenie: uchebnoe posobie [Computer Vision: Textbook]*. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge. 752 p. EDN: NEWUVN. [in Russian].
6. Markovkina A. I., Krivov A. V., Makarov V. S., Belyakov V. V. (2020). Positioning systems for excavation equipment. *Innovatsionnoe razvitie pod'emno-transportnoy tekhniki: materialy*

Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative Development of Lifting and Transport Equipment: Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conf.], 1, 37–46. [in Russian].

7. Khvalev P. S., Satyukov A. B., Orekhov S. A. (2017). Information technologies of automatic leveling in road construction machinery. *Innovatsionnoe razvitie pod'emno-transportnoy tekhniki: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative development of lifting and transport equipment: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]*, 31-05, 11–15. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-11 [in Russian].

8. Bukreev I. A. (2010). Combination of advantages of 3D machine control system. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii [Construction Equipment and Technologies]*, 6, 54–56 [in Russian].

9. Bukreev I. A. (2011). An insider's view: Modern automatic leveling systems for construction machinery. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii [Construction machinery and technology]*, 8, 78–81. [in Russian].

10. Knyshev A. V., Kolesnichenko I. E., Nichiprov A. A. (2019). Control systems for construction equipment. *Sovremennye prikladnye issledovaniya: materialy tret'ey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Shakhty, 16–19 aprelya 2019 goda [Modern Applied Research: Proc. of the Third National Sci.-Pract. Conf., Shakhty, April 16–19, 2019]*. Shakhty: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekh. un-t (NPI) im. M.I. Platova. P. 25–27. EDN: LPOWWZ. [in Russian].

11. Hem-Nav. Retrieved from: <https://hem-nav.ru/resheniya> (accessed: 19.05.2025).

12. Cube-3D. Retrieved from: <https://cube-3d.ru/> (accessed: 19.05.2025).

13. Trimble Heavy Industry – Machine Control. Retrieved from: <https://heavyindustry.trimble.com/en/products/civil-construction/machine-control> (accessed: 19.05.2025).

14. FJDynamics. Retrieved from: <https://www.fjdynamics.com/> (accessed: 19.05.2025).

15. Topcon Earthmoving Solutions. Retrieved from: <https://www.topconpositioning.com/gb/en/solutions/infrastructure/earthmoving> (accessed: 19.05.2025).

16. Roshchin D. A. (2022). Application of machine vision system for spatial position control of construction machinery. *Izmeritel'naya tekhnika [Measurement Techniques]*, 3, 29–35. DOI: 10.32446/0368-1025. EDN: JZXKBN. [in Russian].

17. Guk A. P., Arbuzov S. A. (2010). Accuracy study of automatic measurement of image point coordinates using SIFT. *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*. Vol. 4, Part 1, 35–38. EDN: PFOMFD. [in Russian].

18. Lopatin D. V. (2023). Analysis of SIFT keypoint descriptor of images. *Molodezh'. Nauka. Obshchestvo – 2021: sbornik studencheskikh rabot Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy mezhdistsiplinarnoy konferentsii, Tolyatti, 20–24 dekabrya 2021 goda [Youth. Science. Society – 2021: Proc. of the All-Russian Student Sci.-Pract. Interdisciplinary Conf., Tolyatti, Dec. 20–24, 2021]*. Tolyatti: Tolyattinskiy gosudarstvennyy universitet. P. 221–224. EDN: YLEUPG. [in Russian].

19. Ultralytics GitHub Repository. Retrieved from: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (accessed: 19.05.2025).

20. Volkovich A. N. (2017). Combined method for calculating disparity value on stereo images in stereo rangefinding tasks. *Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii [Information Technologies and Nanotechnologies]*, 720–726. EDN: YQLPPD. [in Russian].

Об авторах

Никита Александрович Жилинский – аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Инна Евгеньевна Дорогова – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Author details

Nikita A. Zhilinskiy – PhD Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Inna E. Dorogova – PhD, Department of Space and Physical Geodesy.

Получено / Received 26.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 27.11.2025

Принята к публикации / Accepted 17.12.2025

УДК 621.396.96

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-22-32>

Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму

Н. С. Косарев¹✉

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

e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена методика контроля многолучевости ГНСС-сигналов, основанная на анализе характеристики сигнала. Предложенная методика включает два этапа: анализ RINEX-файлов с оценкой среднеквадратической ошибки (СКО) в программных продуктах RINGO и TEQC и фильтрацию данных на основе пороговых значений, аппроксимированных полиномом четвертой степени. Критерием качества оценки СКО кодовой многолучевости является критерий REC, рекомендуемый руководящими документами Международной ГНСС-службы (IGS), относительно качества данных, применимыми как к текущим активным станциям, так и к предлагаемым станциям, и который равен 0,3 м. Апробация разработанной методики проведена на данных с пунктов NSK1 и NOVМ за февраль–март 2025 г. Пункт NSK1 входит в фундаментальную астрономо-геодезическую сеть Российской Федерации, а пункт NOVМ является одним из пунктов Международной ГНСС-службы. Условия наблюдений на этих пунктах различные, пункт NSK1 имеет открытый горизонт, в то время как пункт NOVМ расположен в районе с плотной городской застройкой. По результатам исследований установлено, что в 90 % случаев применение методики улучшает коэффициент Ratio, что свидетельствует о повышении точности разрешения фазовых неоднозначностей. Стоит отметить, что методика может быть улучшена за счёт сглаживания данных, которые подвержены влиянию многолучевости, в качестве такого фильтра может выступать адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа.

Ключевые слова: многолучевость, отношение плотности несущей к шуму, ГНСС, ФАГС, IGS, RINEX

Для цитирования:

Косарев Н. С. Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 22–32. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-22-32>

Multipath Monitoring Technique Based on Carrier-to-Noise Density Ratio Analysis

N. S. Kosarev¹✉

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

e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Abstract. The article presents a methodology for monitoring GNSS signal multipath based on the carrier-to-noise density ratio analysis. The proposed approach comprises two stages: analysis of RINEX files with root mean square error (RMSE) estimation using RINGO and TEQC software, followed by data filtering based on threshold values approximated by a fourth-degree polynomial. The quality criterion for code multipath RMSE assessment is the REC metric, recommended by International GNSS Service (IGS) guidelines on data quality, applicable to both current active stations and proposed stations, with a thresh-

old of 0.3 m. The methodology was validated using data from NSK1 and NOVМ stations for February-March 2025. NSK1 station is part of the Fundamental Astro-Geodetic Network (FAGN) of the Russian Federation, while NOVМ is an IGS station. Observation conditions differ: NSK1 features an open horizon, whereas NOVМ is located in an area with dense urban development. Research results show that the methodology improves the Ratio coefficient in 90% of cases, indicating enhanced phase ambiguity resolution accuracy. Notably, the approach can be further refined through smoothing of multipath-affected data using an adaptive Kalman-type recursive filtering procedure.

Keywords: multipath, carrier-to-noise density ratio, GNSS, FAGN, IGS, RINEX

For citation:

Kosarev N. S. (2026). Multipath Monitoring Technique Based on Carrier-to-Noise Density Ratio Analysis. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 22–32. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-22-32>

Введение

Эффект многолучевого распространения ГНСС-сигналов возникает во время приема антенной одновременно прямого сигнала навигационного спутника и этого же сигнала, отраженного от окружающих объектов и поверхностей [1, 2]. Многолучевость зависит от вида измерений (кодовые и фазовые), их частоты и взаимного положения спутник-приемник. При неизменном окружении антенны, то есть при статических измерениях, величина ошибки позиционирования, вызванная многолучевостью, медленно изменяется в течение сеанса наблюдений.

К сожалению, полностью исключить влияние многолучевости в ГНСС-сигналах не представляется возможным, хотя есть ряд подходов для ее ослабления. Для ослабления влияния многолучевости рекомендуют выбирать для измерений места с открытым радиогоризонтом, а при невозможности переноса точки – устанавливать ГНСС-антенны специальных конструкций (дрессельные кольца, экраны и т. д.), использовать уменьшающие или исключаяющие этот эффект комбинации измерений (кодовых и фазовых псевдодальностей [1], по фазовым разностям через звездные сутки [3]), использовать алгоритмы фильтрации измеренных псевдодальностей [4–6]. Другой подход к оценке многолучевости – создание специальных стендов, имитирующих переотраженные ГНСС-сигналы [7, 8].

Существенно уменьшить вклад этой ошибки при кодовых измерениях можно усреднением результатов за некоторый период

времени, а при измерениях по фазе несущей – увеличением продолжительности сеансов синхронных измерений базовой линии [3]. Для базовой станции уменьшение многолучевости методом усреднения не подходит, поскольку ошибки многолучевости меняются со временем и местом приема сигналов от спутников.

В рамках данной статьи представлена разработанная методика выявления многолучевости в измерениях кодовых и фазовых псевдодальностей на основании анализа отношения плотности несущей частоты к шуму, зафиксированной приемником в файле наблюдений. Теоретически предложенный подход базируется на ряде зарубежных публикаций [9, 10].

Стоит отметить, что предлагаемую методику стоит включить в виде алгоритма в отечественный программный продукт для автоматизированного геодезического мониторинга для контроля многолучевости данных ГНСС.

Теоретические основы многолучевого распространения ГНСС-сигнала

Общие сведения о многолучевости. Многолучевость, как отмечено выше, возникает во время приема ГНСС-антенной одновременно прямого сигнала спутника и сигнала, отраженного от окружающих объектов и поверхностей. Многолучевые сигналы всегда проходят более длинный путь, чем прямые, при этом амплитуда отраженного сигнала уменьшается из-за затухания. Затухание сигнала зависит от отражающего материала, угла падения и поляризации сигнала [1].

Величина многолучевости фазовых ГНСС-измерений может быть представлена с использованием плоской вертикальной отражающей поверхности (рис. 1).

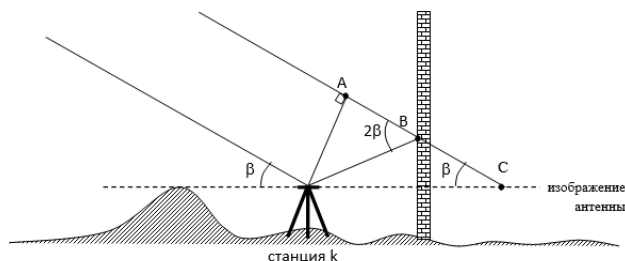


Рис. 1. Геометрия плоской вертикальной отражающей поверхности [3, 11]

Предположим, что прямой и отраженный сигналы представлены как

$$S_D = A \cos(\varphi); \quad (1)$$

$$S \approx S_D + S_R = A \cdot \sqrt{1 + 2\alpha \cdot \cos \theta + \alpha^2} \cdot [\cos(\varphi + \psi)]. \quad (4)$$

В формуле (4) ψ – результирующая фаза многолучевого сигнала, которая определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\alpha \cdot \sin \theta}{1 + \alpha \cdot \cos \theta}. \quad (5)$$

Принимая в формуле (5) $\alpha = 1$ и преобразуя, получим $\psi = 0,5 \cdot \theta$.

В табл. 1 приведена зависимость результирующей фазы многолучевого сигнала от результирующей фазы отраженного сигнала (по формуле (5)) [2].

Таблица 1. Зависимость результирующей фазы многолучевого сигнала от результирующей фазы отраженного сигнала

$\psi, ^\circ$	α	$\theta, ^\circ$
0	2	0
90	$\sqrt{2}$	45
180	0	90

Из табл. 1 видно, что максимальное значение результирующей фазы многолучевого сигнала будет при $\theta = 90^\circ$, которая составляет $\frac{1}{4}$ длины волны, что дает в линейной мере для частоты $L1$ системы GPS примерно 5-6 см. Для линейных комбинаций различных частот

$$S_R = \alpha A \cos(\varphi + \theta), \quad (2)$$

где S_R – величина отраженного сигнала; S_D – величина прямого сигнала; A – амплитуда сигнала (напряжение сигнала); α – коэффициент затухания; θ – фаза отраженного сигнала.

Фаза отраженного сигнала может быть записана как

$$\theta = 2\pi f \Delta\tau + \varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} \cdot \cos \beta + \varphi, \quad (3)$$

где f – частота несущего сигнала; $\Delta\tau$ – временная задержка; φ – дробная часть фазы сигнала, d – расстояние от отражающей поверхности до ГНСС-антенны, λ – длина волны несущего сигнала; β – угол возвышения спутника ГНСС.

Сумма прямой и отраженных волн в антенне приемника даст результирующее поле S , которое можно представить в виде векторной суммы

влияние многолучевости будет зависеть от вида комбинации.

Многолучевость кодовой псевдодальности ведет себя во многом подобно фазе несущей, за исключением того, что изменения на несколько порядков больше. Кодовая многолучевость, в отличие от фазовой, зависит от скорости кодов и внутреннего интервала дискретизации приемника. Обычно величина кодовой многолучевости составляет около 10 м, но в отдельных случаях может достигать 150 м для стандартного (гражданского) кода и 15 м для точного (военного) кода.

Связь многолучевости с величиной отношения плотности несущей к шуму

Для отслеживания мощности принимаемого сигнала различных спутников в ГНСС-приёмниках используются две величины: отношение плотности несущей частоты к шуму (C/N_0) и отношения сигнал/шум (SNR). Эти величины взаимозаменяемы, но при этом они имеют фундаментальные различия, которые зачастую упускаются из виду.

Отношение сигнал/шум (SNR) определяется следующим образом [12]

$$SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{CNR}{B_p} \right), \quad (6)$$

где CNR – отношение несущей к шуму; B_p – ширина полосы шума в Гц.

С другой стороны отношение сигнал/шум (SNR) может быть записано в следующей форме:

$$SNR = S - N, \quad (7)$$

где S – мощность сигнала, обычно мощность несущей, выраженная в единицах децибел/милливатт (дБм) или децибел/ватт (дБВт); N – мощность шума, обычно незначительная, выраженная в единицах децибел/милливатт (дБм) или децибел/ватт (дБВт).

Отношение сигнал/шум связано с результирующим полем (см. формулу (4)) следующим образом:

$$SNR \approx S = S_D + S_R = A \cdot \sqrt{1 + 2\alpha \cdot \cos \theta + \alpha^2} \cdot [\cos(\varphi + \psi)]. \quad (8)$$

В свою очередь отношение плотности несущей к шуму (C/N_0) – это отношение мощности несущей и мощности шума на единицу ширины полосы пропускания, которое связано с отношением сигнал/шум (SNR) следующим образом [12]:

$$C/N_0 = SNR + BW, \quad (9)$$

где BW – это полоса пропускания, которая обычно представляет собой эквивалентную шуму полосу пропускания последнего каскада фильтра во входном каскаде приемника. Обычно значения величины C/N_0 в приемнике, который отслеживает гражданский код на частоте $L1$, находятся в диапазоне от 37 до 45 дБ/Гц.

В отечественной геодезической литературе термин «отношение плотности несущей к шуму» зачастую заменяют на «отношение сигнал/шум», в силу недостаточной, как отмечалось в [13], подготовленности технических специалистов и переводчиков. Критически важным корректное использование термина становится при анализе непосредствен-

ных измерений и их характеристик из RINEX-файлов, поскольку неверное понимание сущности приведенных величин влечет за собой неверную их интерпретацию или преобразование в алгоритмах.

Материалы и методы

Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму. Выявление наличия многолучевости в спутниковых измерениях на определяемой станции выполняется с использованием файла наблюдений (moveDOYi.YY0), программ анализа наблюдений (TEQC или RINGO) в несколько этапов (рис. 2).

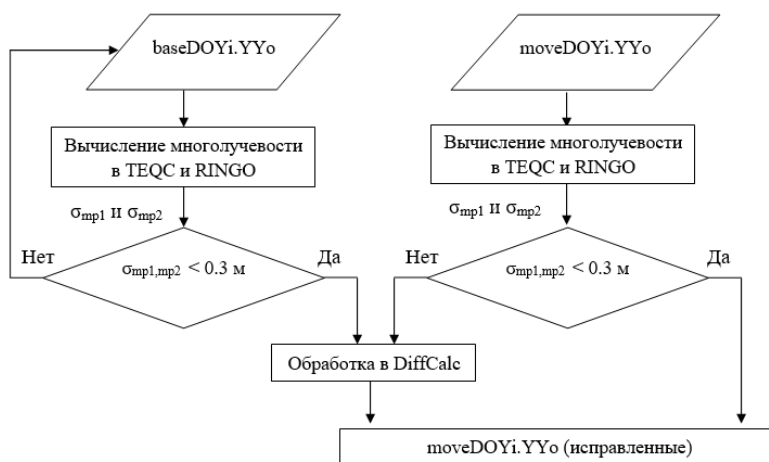


Рис. 2. Схема методики контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей

Первый этап – оценка значения многолучевости для каждого частотного диапазона ГНСС. С помощью программ TEQC или RINGO выполняется анализ RINEX-файлов определяемой (moveDOYi.YY0) и базовой (baseDOYi.YY0) станций, по результатам которого вычисляется линейная комбинация (ЛК) кодовых и фазовых псевдодальностей, показывающая величину многолучевости [14, 15]

$$MP_{ij} = P_i - L_i - \frac{2 \cdot f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \cdot (L_i - L_j), \quad (10)$$

где P_i – кодовая псевдодальность на несущей частоте f_i ; L_i – фазовая псевдодальность на несущей частоте f_i , f_i и f_j – несущая частота i и j сигналов ГНСС.

В ЛК (10) присутствует не только многолучевость и шум кодовых измерений, но и фазовая многолучевость и шум фазы несущей, фазовая неоднозначность N и аппаратные задержки. Фазовая многолучевость и шум фазы несущей намного меньше, чем кодовая многолучевость и шум псевдодальности, поэтому первую можно игнорировать.

Для устранения фазовой неоднозначности N и аппаратных задержек из уравнения (10) выполняется усреднение данных во времени на дуге орбиты спутника [16]

$$mp_{ij} = MP_{ij} - \frac{\sum_{t=1}^m MP_{ij}}{m}, \quad (11)$$

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

В программных продуктах TEQC и RINGO усреднение данных во времени, по своей сути, является скользящим средним, и окно выборки N составляет 50 значений.

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \left[\left(mp_{ij} \right)_k - \left(mp_{ij} \right)_{\text{ср}} \right]^2}{n-1}}, \quad (12)$$

где $\left(mp_{ij} \right)_{\text{ср}}$ – среднее значение величины mp_{ij} .

Усредненное значение СКО кодовой многолучевости для каждого частотного диапазона ГНСС сравнивается с критерием качества REC, который равен 0,3 м [17]. Данный критерий введен руководящими документами Международной ГНСС-службы (МГС) для оценивания качества наблюдений на постоянно действующих базовых станциях, включенных в сеть МГС, и к наблюдениям станций – кандидатов на включение в эту сеть.

Если усредненное значение СКО кодовой многолучевости в анализируемом файле не превышает REC, то файл передается для дальнейшей совместной обработки в штатном ПО. Данный результат является обязательным для наблюдений базовой станции.

При превышении заданного порога вычисленной величины усредненного значения СКО кодовой многолучевости выполняется анализ отношения плотности несущей к шуму и фильтрация наблюдений.

Второй этап – анализ отношения плотности несущей к шуму. В программном продукте DiffCalc, разработанном коллективом авторов [18], осуществляется анализ плотности несущей к шуму, входными параметрами для которого являются набор RINEX файлов наблюдений и навигационных параметров определяемой и базовой (*.**o, *.**n и *.**g) станций (рис. 3).

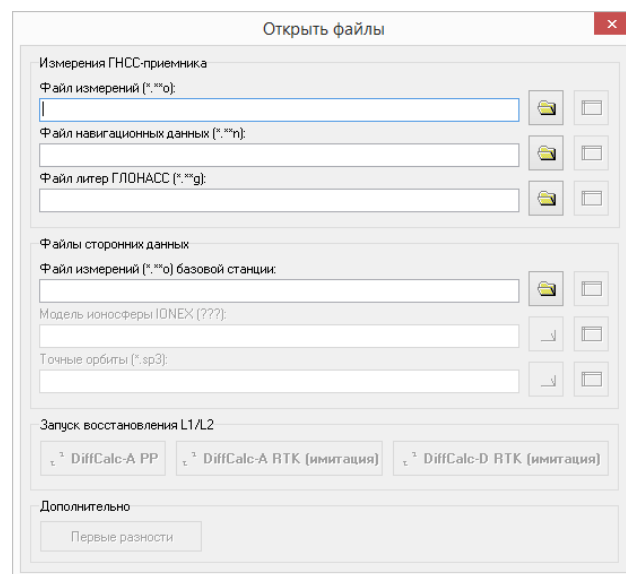


Рис. 3. Главное меню программы DiffCalc

Последовательно осуществляются следующие шаги:

– выполняется чтение RINEX-файла базовой станции (БС) и определяемой станции (ОС), после которого составляется массив данных значений отношения плотности несущей к шуму C/N_0 для всех наблюдаемых спутников ГНСС;

– вычисляется угол возвышения β всех наблюдаемых спутников ГНСС на БС и ОС в каждый момент наблюдений;

$$f(\beta) = (C/N_0)_s = a + b \cdot \beta + c \cdot \beta^2 + d \cdot \beta^3 + e \cdot \beta^4, \quad (14)$$

где β – угол возвышения наблюдаемых спутников ГНСС;

– выполняется сравнение значения C/N_0 наблюдаемого спутника ГНСС на каждый момент времени ОС с вычисленным значением C/N_0 из полинома четвертой степени на БС, если разность превышает 10 дБ/Гц, то измерения, которые не проходят пороговое значение, не участвуют на этапе совместной обработки [10, 19]

$$|C/N_0(\beta) - (C/N_0)_s| < 10, \quad (15)$$

где $C/N_0(\beta)$ – значение отношения плотности несущей к шуму на каждый момент времени на ОС, полученной из массива данных с известным углом возвышения β наблюдаемого спутника ГНСС.

Апробации методики контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму. Апробация методики адаптивного контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму была выполнена на суточных ГНСС-измерениях, собранных на пункте ФАГС – NSK1, и на пункте Международной ГНСС службы – NOVМ, продолжительностью два месяца с февраля по март 2025 г.

Условия наблюдений на пунктах различаются: на пункте ФАГС открытый радиогоризонт, а на пункте МГС – полузакрытый радиогоризонт, поэтому в предлагаемой методике в качестве базовой станции выступал пункт NSK1, а мобильной – NOVМ. В табл. 2 приведены общие сведения о пунктах, участвующих в апробации методики.

– массив данных значений C/N_0 базовой станции ранжируется по углу возвышения спутников β ;

– определяется функциональная зависимость отношения плотности несущей к шуму (C/N_0) к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС

$$f(\beta) = C/N_0; \quad (13)$$

– функциональная зависимость $f(\beta)$ аппроксимируется полиномом четвертой степени

Таблица 2. Общие сведения о пунктах

	NSK1	NOVM
ГНСС-антенна	LEIAR20 LEIM	JPSREGANT_SD_E1
ГНСС-приёмник	Leica GR50	JPS LEGACY
Стандарт частоты	Рубидиевый	Водородный
Отслеживаемые сигналы	GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и BEIDOU	GPS и ГЛОНАСС
Условия наблюдений	Открытый радиогоризонт	Наличие городской застройки

Результаты обработки ГНСС-данных

В соответствии с разработанной методикой на первом этапе был выполнен анализ шестидесяти суточных RINEX файлов с помощью программных продуктов TEQC и RINGO. По результатам анализа установлено, что на пункте Международной ГНСС-службы NOVМ усредненное значение СКО кодовой многолучевости по всем наблюдаемым спутниковым системам превышает заданный порог в 0,3 м, в то же время на пункте ФАГС NSK1 этого не наблюдается. Полученный результат полностью коррелирует с условиями наблюдений на этих пунктах.

На втором этапе с помощью программы DiffCalc были определены функциональные зависимости отношения плотности несущей к шуму C/N_0 к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС для частотных диапазонов L1 и L2. Всего было получено 270 000 значений C/N_0 , которые затем были ранжированы и сгруппированы по высоте спутника от 10 до 90 градусов с шагом один градус. Далее

сгруппированные данные были осреднены, после чего построена функциональная зависимость отношения плотности несущей к шуму (C/N_0) к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС (рисунок 4).

На рис. 4 показаны: красным цветом – осредненные значения отношения плотности

несущей к шуму на частоте L1, синим – на частоте L2.

На этапе совместной обработки осуществлялось вычисление базовой линии NSK1-NOVM в специализированном программном обеспечении RTKPOST при следующих настройках (рис. 5).

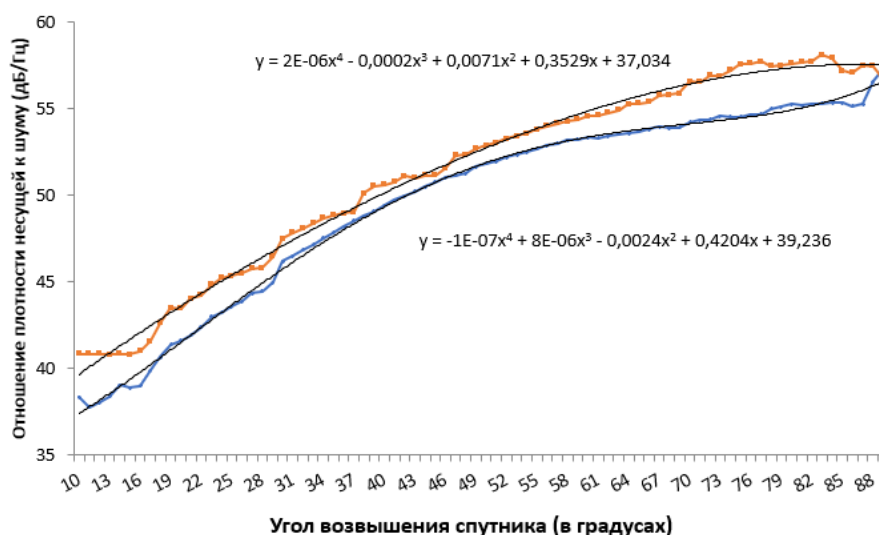


Рис. 4. Функциональная зависимость отношения плотности несущей к шуму (C/N_0) к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС (на базовой станции)

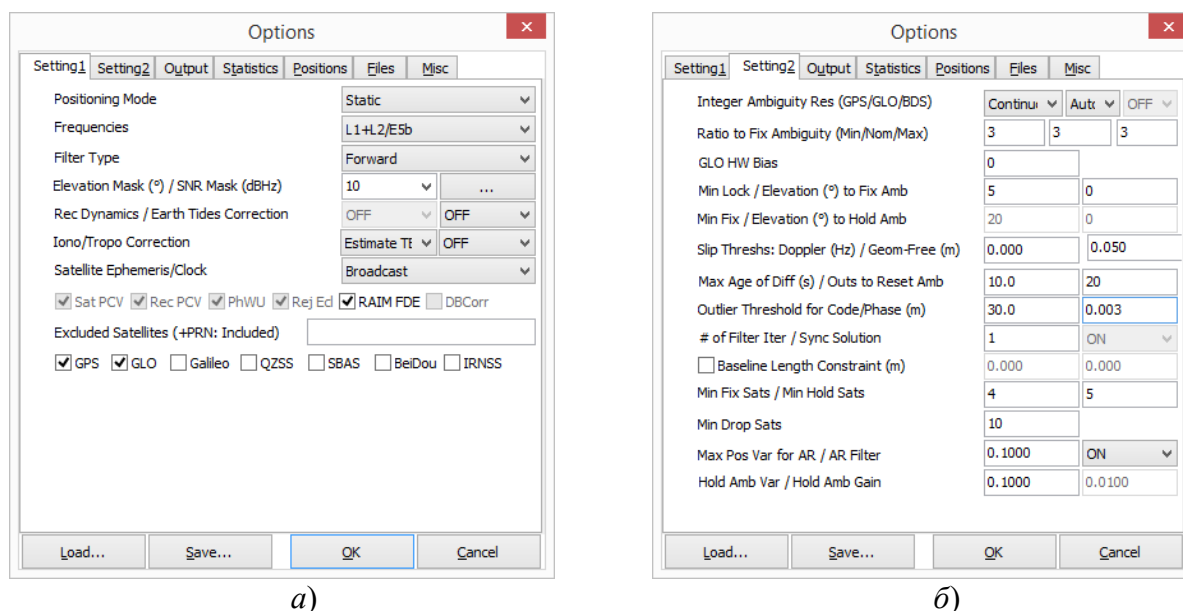


Рис. 5. Настройки в RTKPOST для обработки базовой линии

Обработка осуществлялась дважды: с учетом сравнения значений C/N_0 каждого наблюдаемого спутника ГНСС на ОС с вы-

численным значением C/N_0 из полинома четвертой степени, а также без исправления данных (рис. 6).

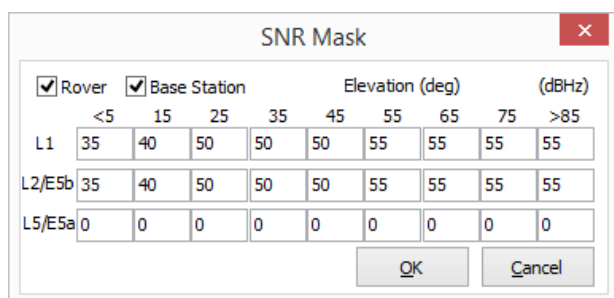


Рис. 6. Опорные значения отношения плотности несущей к шуму

Всего было обработано 120 базовых линий, каждая из которых имела продолжительность 24 часа. В качестве критерия оценки качества обработки БЛ выступала величина Ratio, которая показывает качество разрешения фазовых неоднозначностей

$$Ratio = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}, \quad (16)$$

где σ_2^2 – дисперсия второго наиболее вероятного варианта разрешения неоднозначностей, σ_1^2 – дисперсия первого вероятного варианта разрешения неоднозначностей. Для получения фиксированного решения во многих программных продуктах по обработке базовых линий используется величина критерия Ratio, равная трем.

В табл. 3 приведены результаты вычислений с 35 по 48 день 2025 г.

Таблица 3. Результаты вычислений с 35 по 48 день 2025 г.

День от начала года	БЛ	До				После			
		m _x	m _y	m _z	Ratio	m _x	m _y	m _z	Ratio
35	NSK1-NOVM	0.0013	0.0014	0.0012	7.9	0.0015	0.0017	0.0016	247.9
36	NSK1-NOVM	0.0012	0.0014	0.0014	27.1	0.0014	0.0017	0.0017	34.5
37	NSK1-NOVM	0.0012	0.0014	0.0013	19.9	0.0014	0.0016	0.0015	23.7
38	NSK1-NOVM	0.0012	0.0015	0.0014	390.2	0.0015	0.0018	0.0017	401.2
39	NSK1-NOVM	0.0012	0.0014	0.0013	222.6	0.0014	0.0016	0.0015	8.8
40	NSK1-NOVM	0.0012	0.0014	0.0013	44.7	0.0014	0.0016	0.0015	63.4
41	NSK1-NOVM	0.0013	0.0014	0.0013	38.8	0.0015	0.0016	0.0016	52.9
42	NSK1-NOVM	0.0013	0.0014	0.0013	135.0	0.0015	0.0016	0.0015	197.0
43	NSK1-NOVM	0.0014	0.0015	0.0014	101.6	0.0015	0.0018	0.0017	13.2
44	NSK1-NOVM	0.0013	0.0014	0.0013	11.1	0.0014	0.0016	0.0015	184.8
45	NSK1-NOVM	0.0013	0.0015	0.0014	118.1	0.0016	0.0018	0.0018	384.2
46	NSK1-NOVM	0.0012	0.0015	0.0013	35.6	0.0014	0.0017	0.0016	43.9
47	NSK1-NOVM	0.0012	0.0015	0.0014	35.9	0.0015	0.0017	0.0016	133.5
48	NSK1-NOVM	0.0012	0.0014	0.0013	29.3	0.0014	0.0015	0.0016	99.0

По результатам проведенных исследований установлено, что в 90 % случаев коэффициент Ratio, определяющих качество разрешения фазовых неоднозначностей, улучшается, что говорит о том, что предложенная методика позволяет эффективно исключать из измерений многолучевость и повышать качество полученных решений. Стоит отметить, что методика может быть улучшена за счёт

сглаживания данных, которые подвержены влиянию многолучевости, в качестве такого фильтра может выступать адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа [20].

Заключение

В статье представлена методика контроля многолучевости ГНСС-сигналов на основе ана-

лиза отношения плотности несущей к шуму, которая позволяет повысить точность геодезических измерений и минимизировать влияние помех, вызванных многолучевым распространением сигналов. Автором предложен последовательный алгоритм обработки данных, включающий анализ RINEX-файлов, оценку среднеквадратической ошибки и фильтрацию измерений на основе пороговых значений отношения плотности несущей к шуму.

Апробация методики на реальных данных показала её эффективность – в 90 % случаев наблюдалось улучшение коэффициента Ratio, что свидетельствует о повышении качества разрешения фазовых неоднозначностей. Это подтверждает, что предложенный подход позволяет исключать из измерений данные, искаженные многолучевостью, и повышать надежность результатов. Стоит отметить, что апробация методики проводилась для базовых

линий длиной до 10 км, что достаточно для использования ее в программных продуктах для автоматизированного геодезического мониторинга.

В настоящее время методика контроля многолучевости ГНСС-сигналов на основе анализа отношения плотности несущей к шуму внедрена в виде алгоритма в отечественный программный продукт для автоматизированного геодезического мониторинга ГЕОМОН [21, 22].

Благодарность

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Teunissen P. J. G., Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. – Springer International Publishing AG, 2017. 1272 p.
2. Misra P. N., Enge P. Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance. USA : Ganga-Jamuna Press, 2001. 390 p.
3. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография в 2-х томах. М. : Картгеоцентр. Том 2. 2006. 360 с.
4. Татарников Д. В., Астахов А. В., Степаненко А. П., Шаматульский П. П., Емельянов С. Н. Антенные технологии высокоточного спутникового позиционирования. Антенны. 2016. № 10 (230). С. 77–89.
5. Вейцель А.В., Жодзишский М.И., Милютин Д.С. Ошибки многолучевости для различных спутниковых сигналов. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 8. С. 34–41.
6. Lau L. Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements. GPS Solutions. 2025. Vol. 29. Paper 42. DOI: 10.1007/s10291-024-01801-9.
7. Куприянов А. О., Нейман Ю. М., Морозов Д. А., Перминов А. Ю. Разработка алгоритма анализа переотражений навигационного сигнала для изучения влияния многолучевости на ГНСС-измерения. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 6. С. 41–44.
8. Перминов А. Ю., Морозов Д. А., Куприянов А. О. Экспериментальная апробация методики определения влияния многолучевости на кодовые и фазовые измерения по сигналам ГНСС. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66. № 5. С. 6–13. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-6-13.
9. Zhang Z., Li B., Gao Y., Shen Yu. Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data. GPS Solutions. 2019. Vol. 23. Paper 7. DOI: 10.1007/s10291-018-0799-6
10. Kubo N., Kobayashi K., Furukawa R. GNSS Multipath Detection Using Continuous Time-Series C/N0. Sensors. 2020. Vol. 20. Paper 4059. DOI: 10.3390/s20144059.
11. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. – New York : A Willey-Interscience Publication. 2015. 806 p.
12. Joseph, A. What is the difference between SNR and CN0. Inside GNSS. 2010. Vol. 11. P. 20–25.

13. Антонович К. М., Косарев Н. С. Преподавание спутниковой геодезии в условиях противоречивой терминологии и нормативной базы. Актуальные вопросы образования. 2014. № 1. С. 60–63. EDN: TVOYRJ.
14. Kawamoto S., Takamatsu N., Abe S. RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*. 2023. Vol. 75(54). P. 1–15.
15. Estey L., Meertens C. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*. 1999. Vol. 3. P. 42–49. DOI: 10.1007/PL00012778.
16. Abou Galala M., Kaloop M. R., Rabah M. M., Zeidan Z. M. Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination. *J. Surv. Eng.* 2018. Vol. 144. 04018002. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250.
17. García-Armenteros J.A. Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*. 2024. Vol. 15(2). P. 189–199. DOI: 10.1016/j.geog.2023.07.006.
18. Косарев Н. С., Шевчук С. О. DiffCalc версия 1.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015661198, 20.10.2015. Заявка № 2015617764 от 26.08.2015. EDN: SHNVCB.
19. Su M., Yang Y., Qiao L., Teng X., Song H. Enhanced multipath mitigation method based on multi-resolution CNR model and adaptive statistical test strategy for real-time kinematic PPP. *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 67(2). P. 868–882. DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.035.
20. Косарев Н.С. Исследование методики контроля фазовых ГНСС-измерений по имитационным данным. *Вестник СГУГиТ*. 2016. № 1. С. 6–13. EDN: WDHJOT.
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.
22. Шоломицкий А. А., Косарев Н. С., Дмитриев И. В., Галкин А. И. ГЕОМОН. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025665224, 11.06.2025. Заявка № 2025662026 от 16.05.2025. EDN: LDDJNL

REFERENCES

1. Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. *Springer International Publishing AG*, 1272 p.
2. Misra, P.N., & Enge, P. (2001) Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance. *USA: Ganga-Jamuna Press*, 390 p.
3. Antonovich, K.M. (2006). *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii. Use of satellite radio navigation systems in geodesy [Use of satellite radio navigation systems in geodesy]*. Moscow: FSUE «Kartgeocenter», 360 p. [In Russian].
4. Tatarnikov, D. V., Astakhov, A. V., Stepanenko, A. P., Shamatulsky, P. P., Emelyanov, S. N. (2016) Antenna technologies for high precision GNSS positioning. *Antenny [Antennas]*, 10 (230), 77-89. [In Russian].
5. Weitzel, A.V., Zhodzishsky, M.I., & Milyutin, D.S. (2009) Multipath errors of various satellite signals. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy. [Information-measuring and control systems]*, 8, 34–41. [In Russian].
6. Lau, L. (2025) Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements. *GPS Solutions*, 29, 42. DOI: 10.1007/s10291-024-01801-9
7. Kupriyanov, A.O., Neumann, Yu.M., Morozov, D.A., & Perminov, A.Yu. (2017) Design of an algorithm for the analysis of reflections of a navigation signal to study the effect of multipath on GNSS measurements. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying» [News of universities “Geodesy and aerial photography”]*, 61(6), 41–44. [In Russian].
8. Perminov, A.Yu., Morozov, D.A., & Kupriyanov, A.O. (2022) Experimental testing of the method for determining the effect of multipath on code and phase measurements from GNSS signals. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying» [News of universities “Geodesy and aerial photography”]*, 66(5), 6–13. [In Russian].
9. Zhang, Z., Li, B., Gao, Y., & Shen, Yu. (2019) Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data. *GPS Solutions*, 23, 7. DOI: 10.1007/s10291-018-0799-6

10. Kubo, N., Kobayashi, K., & Furukawa, R. (2020) GNSS Multipath Detection Using Continuous Time-Series C/N0. *Sensors*, 20, 4059; DOI: 10.3390/s20144059
11. Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015) *GPS Satellite Surveying*. New York: A Willey-Interscience Publication. 806 p.
12. Joseph, A. (2010) What is the difference between SNR and CN0. *Inside GNSS*, 11, 20–25.
13. Antonovich, K. M., & Kosarev, N. S. (2014) Teaching satellite geodesy amid contradictory terminology and regulatory frameworks. *Aktual'nyye voprosy obrazovaniya [Current Issues in Education]*, 1, 60–63. [In Russian].
14. Kawamoto, S., Takamatsu, N., & Abe, S. (2023) RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*, 75(54), 1 – 15.
15. Estey, L., & Meertens, C. (1999) TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*, 3, 42–49. DOI: 10.1007/PL00012778
16. Abou Galala, M., Kaloop, M.R., Rabah, M.M., & Zeidan, Z.M. (2018) Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination. *J. Surv. Eng.*, 144, 04018002. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250
17. García-Armenteros, J.A. (2024) Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*, 15(2), 189-199 DOI: 10.1016/j.geog.2023.07.006
18. Kosarev, N.S., Shevchuk, S.O. (2015) DiffCalc version 1.0. Certificate of software registration RU 2015661198; applied 2015-08-26, issued 2015-10-20. [in Russian].
19. Su, M., Yang, Y., Qiao, L., Teng, X., & Song, H. (2021) Enhanced multipath mitigation method based on multi-resolution CNR model and adaptive statistical test strategy for real-time kinematic PPP. *Advances in Space Research*, 67(2), 868-882 DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.035
20. Kosarev, N. S. (2016) Research method of control phase GNSS measurements based on simulation data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1, 6–13. EDN: WDHJOT [in Russian]
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]
22. Sholomitskii, A.A., Kosarev, N. S. Dmitriev, I.V., & Galkin, A.I. (2025) GEOMON // Certificate of software registration RU 2025665224; issued 2025-06-11, applied 2025-05-16. EDN: LDDJNL

Об авторах

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

About author

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

Получено / Received 26.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.09.2025

Принята к публикации / Accepted 18.11.2025

УДК 528.482: [69:004]

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-33-42>

Исследование точности прототипа малобюджетного цифрового датчика слежения за вертикальными смещениями на основе алгоритмов компьютерного зрения

А. В. Мареев¹✉, М. А. Попков¹, В. Р. Янгальшев¹, Д. С. Мамаев¹

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

e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru ⁴

Аннотация. В статье представлено исследование разрабатываемого в лаборатории автоматического геодезического мониторинга СГУГиТ прототипа малобюджетного высокоточного цифрового датчика вертикальных перемещений. Датчик представляет собой колокацию полупроводникового лазера и видеоинклинометра, размещаемых на опорной точке, а также экрана с цифровой видеокамерой, фиксируемого на контролируемой точке. Датчик может использоваться в составе систем геодезического мониторинга для раннего предупреждения техногенных аварий. В результате исследования установлено, что цифровой датчик способен измерять вертикальные перемещения с ошибкой 3 мм на расстоянии до 50 м. Разрабатываемый прототип датчика вертикальных перемещений характеризуется низкой стоимостью и, в перспективе, позволит удешевить системы наблюдений геодезического мониторинга. В статье приведены ссылки на открытое программное обеспечение для организации системы наблюдений с помощью проектируемого датчика и исходные данные эксперимента.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, геотехнический мониторинг, цифровой инклинометр, компьютерное зрение, открытое программное обеспечение

Для цитирования:

Мареев А. В., Попков М. А., Янгальшев В. Р., Мамаев Д. С. Исследование точности прототипа малобюджетного цифрового датчика слежения за вертикальными смещениями на основе алгоритмов компьютерного зрения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 33–42. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-33-42>

Accuracy assessment of a low-cost digital sensor prototype for vertical displacement monitoring using computer vision algorithms

A. V. Mareev¹✉, M. A. Popkov¹, V. R. Yangalyshev¹, D. S. Mamaev¹

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

e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru

Abstract. The article presents a research on a low-cost, high-precision digital vertical displacement sensor prototype developed at the SSUGT Laboratory of Automatic Geodetic Monitoring. The sensor consists of a collocated semiconductor laser and video inclinometer mounted on a reference point, paired with a screen and digital video camera affixed to the monitored point. It is suitable for integration into geodetic monitoring systems to provide early warnings of anthropogenic hazards. The study proves that the sensor measures vertical displacements with a 3 mm error at distances up to 50 m. The prototype holds potential to reduce the expense of geodetic monitoring systems. The article

also includes references to open-source software for implementing the observation system with the proposed sensor, as well as the raw experimental data.

Keywords: geodetic monitoring, geotechnical monitoring, digital inclinometer, computer vision, open source software

For citation:

Mareev A. V., Popkov M. A., Yangalyshev V. R., Mamaev D. S. (2026). Accuracy assessment of a low-cost digital sensor prototype for vertical displacement monitoring using computer vision algorithms. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 33–42. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-2-33-42>

Введение

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений особое внимание уделяется обеспечению безопасности за счёт контроля структурной целостности несущих конструкций. Контроль осуществляется в рамках геодезического мониторинга посредством эпизодических или непрерывных инструментальных измерений. Для большинства объектов гражданской и промышленной инфраструктуры при геодезическом мониторинге применяют сочетание линейно-угловых измерений и геометрического нивелирования. Измерения выполняются вручную с установленной периодичностью в соответствии с программами наблюдений. Однако существует ряд дополнительных потенциальных направлений внедрения автоматизированных систем геодезического мониторинга.

Первое направление — мониторинг жилых, административных и промышленных зданий, срок эксплуатации которых приближается к нормативному пределу. К ним относятся здания из сборного железобетона и блочных конструкций, массово возводившиеся с конца 1940-х гг. На долю пятиэтажных зданий советской серии приходится около 20 % жилищного фонда России; при этом 80 % таких зданий требуют физического обновления [1]. Темпы реновации недостаточны, что приводит к фактическому продлению срока эксплуатации. В результате возникает потребность применения дополнительных мер обеспечения безопасности. Особенно важен оперативный контроль структурной целостности старого жилого фонда, вблизи которого проводятся интенсивные строительные работы, поскольку потенциально опасные деформационные процессы в таких зданиях могут протекать с высокой скоростью.

Второе направление — эксплуатация зданий и сооружений в регионах Крайнего Севера. Риск аварийных ситуаций в этих регионах возрастает вследствие таяния многолетнемерзлых грунтов. По оценкам [2], совокупный мировой ущерб от глобального потепления к 2050 г. может достичь 132 млрд долларов. При этом 75 % объёма нефтегазодобычи в Российской Федерации сосредоточено в зонах Крайнего Севера, а инфраструктура подвержена риску, связанному с нестабильностью оснований. Поэтому геодезический мониторинг на Крайнем Севере представляет собой стратегически важную задачу как с точки зрения природопользования, так и экономики.

В настоящее время для непрерывного геодезического мониторинга применяют роботизированные тахеометры, цифровые инклинометры, ГНСС-приёмники и гидростатические нивелиры [3, 4]. Устройства отличаются высокой стоимостью и не предназначены для массового внедрения. Большинство приборов произведено зарубежными компаниями и не адаптировано к эксплуатации при низких температурах.

Компания Trimble представила в 2024–2025 гг. новые приборы геотехнического мониторинга: Trimble GNSS Meter и Trimble Laser-Tilt Meter. Первое устройство представляет собой коллокацию ГНСС-приёмника и датчика наклона, второе — датчика наклона и лазерного дальномера. Приборы предназначены для наблюдений на коротких базах, функционируют без внешнего электропитания и связи, обеспечивают автономную работу в течение двух лет. Диапазон рабочих температур составляет от –40 до +80 °С. Однако данные устройства не поставляются на российский рынок, а их стоимость превышает

тысячу долларов за единицу, что исключает возможность массового применения.

Таким образом, для повышения уровня безопасности эксплуатации зданий и сооружений в России требуется разработка масштабируемых методов геодезического мониторинга, способных функционировать в широком диапазоне внешних условий, включая низкие температуры [5]. Для достижения массовости геодезического мониторинга необходимо обеспечить ценовую доступность, сопоставимую с системами безопасности, такими как наружное видеонаблюдение или пожарная сигнализация.

Перспективным направлением повышения экономической эффективности систем мониторинга являются системы наблюдений на основе совместного использования цифровых видеокамер, полупроводниковых лазеров и алгоритмов технического зрения [6, 7]. Известны методы высокоточного определения изменений расстояния с помощью лазерной триангуляции [8], а также способы оценки углов наклона по перемещению пузырька в цилиндрическом уровне [9, 10]. Широко распространены створные системы наблюдений за деформациями, основанные на отслеживании лазерного луча с помощью цифровых камер и технического зрения [11–14]. Развитие таких систем обусловлено доступностью открытых библиотек, таких как OpenCV, и удешевлением энергоэффективных цифровых плат с видеокамерами. Большинство подобных систем остаются прототипами, и лишь единичные реализации применяются для непрерывного мониторинга.

Исследования в данной области сфокусированы на повышении качества обработки изображений и устойчивости к внешним воздействиям, в первую очередь — к изменяющемуся освещению. В обзорной работе [6] выделены два ключевых направления дальнейшего развития технологии: разработка упрощенных и доступных программно-аппаратных комплексов для долгосрочных геотехнических исследований и изучение долговременной стабильности датчиков в условиях изменяющейся внешней среды.

Учитывая изложенное, для повышения доступности геодезического мониторинга требу-

ется разработка открытых программно-аппаратных решений, способствующих внедрению технологий технического зрения в системы контроля конструктивной целостности. Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная оценка возможностей системы слежения на основе бюджетных цилиндрических уровней, полупроводниковых лазерных модулей, малобюджетных цифровых процессоров, цифровых видеокамер и программ технического зрения при наблюдениях за вертикальными смещениями в рамках геодезического мониторинга для потенциальной замены дорогостоящего оборудования, и обеспечения эксплуатации в условиях низких температур.

Методика исследования

Для проверки результатов исследования использовались следующие метрики: арифметическое среднее значение, среднеквадратическое отклонение разностей вертикальных перемещений, определяемых с использованием прототипа датчика вертикальных перемещений (ДВП) и их последующего сравнения с эталоном. На рис. 1 представлена схема измерительного узла для способа определения вертикальных перемещений объекта контроля геодезического мониторинга на основе тригонометрического нивелирования, который реализуется при помощи измерительного и реперного модулей.

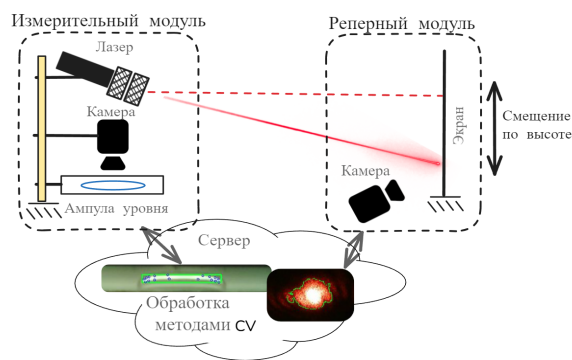


Рис. 1. Схема измерительного узла датчика вертикальных перемещений

Калиброванные реперный и измерительный модули располагаются на расстоянии до 50 м друг от друга в условиях прямой видимости.

сти под малым углом наклона лазерного луча относительно горизонта. Наклон измерительного модуля фиксируется термокомпенсированной системой слежения за перемещением пузырька уровня по цилиндрической ампуле с использованием программы компьютерного зрения, основанной на библиотеке OpenCV; описание программы наклона представлено в работе [15]. Изменение наклонной дальности (расстояния между реперным и измеритель-

ным модулем) определяется в результате оценки расходимости лазерного луча путем отслеживания программой компьютерного зрения изменения видимой площади лазерного пучка на экране реперного модуля. В то же время величина перемещения лазерного луча отслеживается программой компьютерного зрения путем вычисления центра масс его проекции. Схема калибровки датчика вертикальных перемещений представлена на рис. 2.



Рис. 2. Uml-диаграмма действий для калибровки датчика перемещений (ДВП)

Смещение по высоте реперного модуля определяется по формуле

$$\Delta u_i = (S_0 + S_i) \cdot \sin(\gamma_0 + \gamma_i) - S_0 \cdot \sin(\gamma_0) - \Delta y_i, \quad (1)$$

где Δu_i – фиксируемые относительные вертикальные перемещения;

S_0, γ_0 – начальные значения наклонной дальности между реперным и измерительными модулями и начальное значение угла наклона лазерного модуля относительно горизонта соответственно;

$S_i, \gamma_i, \Delta y_i$ – фиксируемые при помощи измерительной системы, основанной на компьютерном зрении, значения изменений

наклонной дальности, угла наклона относительно горизонта и перемещения лазерного луча по экрану.

Уравнение (1) линеаризуется разложением в ряд Тейлора второго сомножителя первого слагаемого $\sin(\gamma_0 + \gamma_i) = \sin(\gamma_0) + \cos(\gamma_0)\gamma_i + O(\gamma_i^2)$.

Система линейных уравнений для определения вектора $\hat{X} = [\widehat{\delta u_i}, \widehat{\delta S_i}, \widehat{\delta \gamma_i}]^T$ с помощью МНК-оптимизации имеет следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -S_0 \cos \gamma_0 & -\sin \gamma_0 \\ (\sin \gamma_0)^{-1} & S_0 \cot \gamma_0 & 0 \\ (S_0 \cos \gamma_0)^{-1} & 0 & \tan \gamma_0 / S_0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \Delta u_i^{app} - S_0 \cos \gamma_0 \cdot \gamma_i - S_i \sin \gamma_0 - \Delta y_i \\ (\Delta S_i^{app} - S_0 \cos \gamma_0 \cdot \gamma_i - \Delta y_i) / \sin \gamma_i - S_i \\ (\Delta \gamma_i^{app} - S_i \sin \gamma_0 - \Delta y_i) / S_0 \cos(\gamma_0) - \gamma_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где u_i^{app} – предвычисленное значение относительного перемещения по формуле (1). Значение вертикального перемещения вычисляется комбинацией $\hat{u}_i = u_i^{app} + \widehat{\delta u}_i$. Общий порядок расчетов в рамках эксперимента представлен на рис. 3.

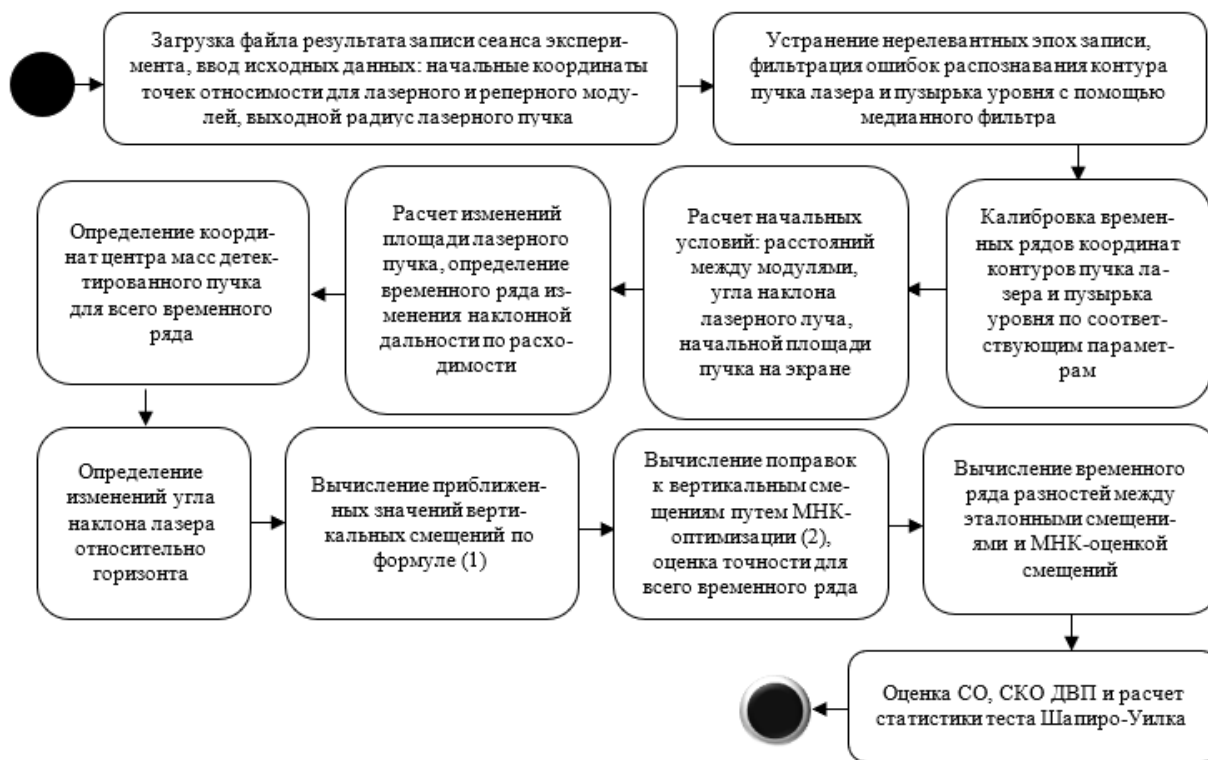


Рис. 3. Uml-диаграмма порядка действий обработки результатов эксперимента

Начальные значения угла наклона γ_0 и дальности между реперным и измерительным модулем S_0 определяются с помощью электронного тахеометра.

Описание эксперимента

Экспериментальная установка для исследования датчика вертикальных перемещений состоит из следующих элементов (рис. 4):

- 1) экзаменатора уровней, снабженного микрометрическим подъемным винтом с шагом 0,01 мм и индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм;
- 2) измерительного модуля, включающего:
 - а) полупроводниковый лазерный модуль 650 нм мощностью 50 мВт;
 - б) инклинометрический блок (рис. 5, а и б): монтажную шпильку формата 5/8 дюйма; цилиндрическую ампулу уровня с це-

ной деления 30" и длиной 64 мм; монтажную пластину, изготовленную из гипсоволокнистого листа; датчик температуры DS18B20, СКО – 0,5 °С; цифровой модуль ESP32-sam с модулем OV2640 с разрешением 2 МП; светодиодную ленту; прозрачную пластину из оргстекла, для теплоизоляции уровней;

3) реперный модуль (рис. 5, в): пластиковый корпус с пластиковым экраном; поляризационный светофильтр на входном окне модуля, модуль ESP32-sam с камерой OV2640, установленный на расстоянии 7 см относительно экрана.

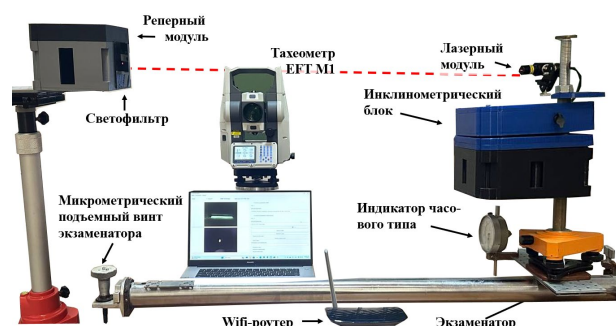


Рис. 4. Фотография элементов экспериментальной установки

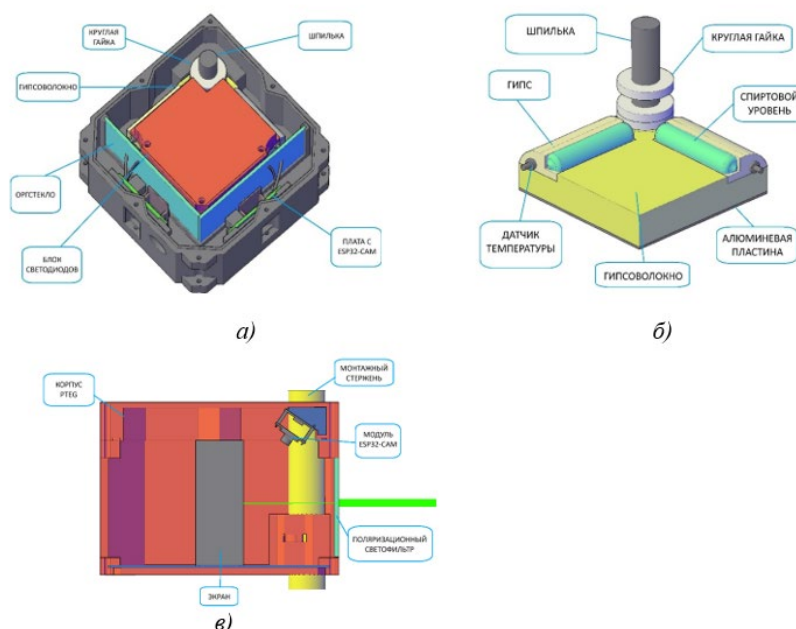


Рис. 5. Чертежи элементов датчика вертикальных перемещений: а), б) инклинометрический блок; в) реперный модуль

Сбор измерительной информации, а также автоматическое распознавание перемещений пузырька уровня и светового пятна лазерного луча выполнялись при помощи программы с графическим пользовательским интерфейсом; сведения о программе можно найти в работе [15]. Эксперимент проводился в подвальном помещении лабораторного корпуса СГУГиТ. В процессе выполнения измерений модули ДВП устанавливались на расстояниях 15, 30, 50 м. Для каждой установки выполнялись определения начальных условий: измерялись расстояние между реперным и изме-

рительным модулем и угол наклона лазерного луча с помощью тахеометра EFT M1 (угловая ошибка – 2", ошибка дальномера – 3 мм).

В пределах каждой из установок выполнялось около 10 перемещений измерительного модуля с шагом 1 мм при помощи подъемного механизма экзаменатора. При расстоянии 50 м сделано 2 сессии записи в разные дни из-за недостаточного количества данных, полученных в ходе первой записи. Сырые данные эксперимента, включая видеозаписи пузырькового уровня и лазерного пятна, результаты автоматического определения пара-

метров слежения, а также скрипт расчетов, можно найти по следующим ссылкам [16, 17].

Результаты

Калибровка камеры ДВП проводилась при помощи подвижного микрометрического столика с ценой деления 0,01 мм. Калибровка инклинометрического модуля выполнялась при помощи инклинометра Leica Nivel 220 в диапазоне $\pm 200''$. Ошибка Leica Nivel 220 в диапазоне $\pm 200''$ составляет 1". По результатам калибровки элементов датчика вертикальных перемещений выполнена априорная оценка точности. Чувствительность датчика вертикальных перемещений на расстоянии 15 м оценивается величиной 0,5 мм при угле наклона лазерного луча относительно горизонта до 1° и ошибке определения расстояния в 10 мм. Для расстояния в 50 м априорная ошибка ДВП составляет 1,4 мм. Ошибка определения угла наклона оценена по величине межквартильного размаха в 5". Ошибка определения перемещений лазерного луча оценивается величиной 0,3 мм.

По результатам эксперимента установлено, что ДВП способен отслеживать смещение с ошибкой 3 мм на расстоянии до 50 м, а на расстоянии до 15 м – с ошибкой 1 мм (рис. 6, 7). В ходе эксперимента выявлено, что полученные величины ошибок измеренных перемещений укладываются в удвоенную величину априорной ошибки и ошибку используемого эталона (табл. 1). По значениям критерия и P-value теста Шапиро – Уилка был сделан вывод о том, что временные ряды разностей не подчиняются нормальному закону распределения, что свидетельствует о наличии неучтенных систематических ошибок.

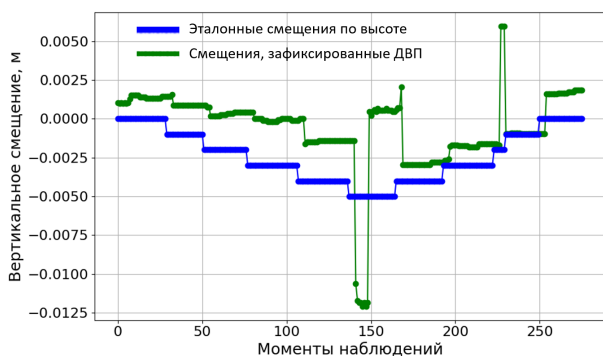


Рис. 6. График временного ряда для сеанса 2 на расстоянии до 50 м

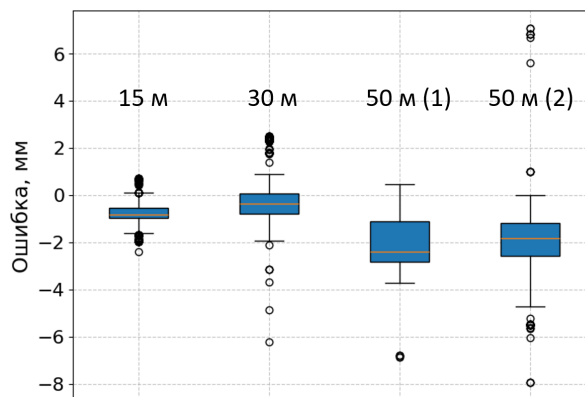


Рис. 7. Гистограмма распределения разностей во временных рядах при отслеживании вертикальных перемещений

Таблица 1. Результаты исследования датчика вертикальных перемещений

Сеанс записи	15 м	30 м	50 м (сеанс 1)	50 м (сеанс 2)
СКО, мм	0,6	1,3	1,2	2,1
СО, мм	-0,7	-0,1	-2,1	-1,8
Априорн. ошибка, мм	0,9	1,1	1,4	1,4
Ошибка эталона, мм	0,01	0,01	0,01	0,01
Критерий теста Шапиро – Уилка	0,97	0,87	0,84	0,84
Шапиро – Уилка тест, P-value	2E-06	7E-16	8E-12	2E-16
Количество движений	15	11	8	11
Количество эпох наблюдений, сек	300	300	140	270

Заключение

Для обеспечения заданной точности измерения вертикальных перемещений на основе рассмотренного в статье способа с применением ДВП на уровне геометрического нивелирования I класса необходимо определять перемещения на расстоянии до 50 м с ошибкой не более 0,04 мм, а для II класса – не более 0,1 мм.

Для замещения тригонометрического нивелирования, выполняемого при помощи роботизированного тахеометра (с характеристиками: угловая точность – 1", ошибка компенсации наклона – 0,5", ошибка измерения расстояния – 1 мм), требуется отслеживать изменения вертикальных перемещений на расстоянии до 50 м с ошибкой порядка 0,4 мм при углах наклона относительно горизонта не

больше 2°. На расстоянии до 10 м роботизированный тахеометр может обеспечить ошибку измерения перемещений порядка 0,1 мм. Согласно паспортным данным упомянутый ранее прибор компании Trimble Laser-tilt, позволяет отслеживать вертикальные перемещения на расстоянии до 50 м с ошибкой 2,0–3,0 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученный результат измерения вертикальных перемещений с применением ДВП пока не соответствует высокоточному геометрическому нивелированию или наблюдениям с применением роботизированных тахеометров и не способен их заменить. При этом ДВП может выступать альтернативой прибору Trimble Laser-tilt.

Потенциальную чувствительность рассмотренного в статье способа с применением ДВП возможно повысить до 0,3–0,5 мм для расстояния до 50 м за счет улучшения качества калиб-

ровки камер и возможных изменений в обработке измерительных видеопотоков. При этом большой вклад в ошибку будет вносить недостаточная точность калибровки камер модулей. Также требуется повысить общую устойчивость системы наблюдений к дестабилизирующим факторам, провести аналогичные измерения уже в условиях, близких к эксплуатационным, и исследовать систему наблюдения на долговременную стабильность.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке госбюджетной НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чувилова И. В., Кравченко В. В. Комплексные методы реконструкции и модернизации массовой жилой застройки. *Academia. Архитектура и строительство*. 2011. № 3. С. 94–100.
2. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Falaleeva A. A., Badina S. V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*. 2022. Vol. 112. No. 1. P. 231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
3. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга. *Вестник СГУГиТ*. 2016. № 1(33). С. 48–61. EDN WDHJQH.
4. Сальников В. Г., Скрипников В. А., Скрипникова М. А., Хлебникова Т. А. Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС. *Вестник СГУГиТ*. 2018. Т. 23, № 3. С. 108–124. EDN YAATIT.
5. 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. EDN DXVPUI.
6. Zhuang Y., Chen W., Jin T., Chen B., Zhang H., Zhang W. A review of computer vision-based structural deformation monitoring in field environments. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 10. Art. no. 3789. DOI: 10.3390/s22103789.
7. Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications. *Signals*. 2023. Vol. 4. No. 3. P. 539–574. DOI: 10.3390/signals4030029.
8. Stepanov V. A., Moos E. N., Shadrin M. V., Savin M. V., Umnyashkin V. N., Umnyashkin A. V., Triangulation Sensor for Measuring Displacements and High-PRECISION Monitoring of Production Performance. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 54–65. DOI: 10.18721/JPM.13105.
9. Рябов Г. Г., Ушакевич А. Н. Автоматизация мониторинга деформаций гидротехнических сооружений водного транспорта. *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. 2013. № 2 (21). С. 95–102.

10. Artese G., Perrelli M., Artese S., Meduri S., Brogno N. POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests. *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 5. P. 10806–10824. DOI: 10.3390/s150510806.
11. Vicente M. A., Gonzalez D. C., Minguez J., Schumacher T. A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections. *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 4. Art. no. 970. DOI: 10.3390/s18040970.
12. Cao J., Chen Y., Yu D., Xu Z., Hu X., Liang Y., Pan S., Wu D. Real-time laser spot detection and tracking system based on parallel multi-target detection and determination algorithm. *Review of Scientific Instruments*. 2023. Vol. 94. DOI: 10.1063/5.0157141.
13. Brown N., Schumacher T., Vicente M. A. Evaluation of a novel video- and laser-based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 11. No. 2. Pp. 265–281. DOI: 10.1007/s13349-020-00450-z.
14. Авхадеев В. Г., Можаров Г. А., Савостин П. И., Чугреев И. Г., Скрыпицина Т. Н., Золотов А. А. Лазерная измерительная сканирующая система для определения критических деформаций линейных объектов. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2019. Т. 63. № 6. С. 636–644. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-636-644.
15. Янгальшев В. Р., Попков М. А., Наумов В. Ю. Программа для калибровки малобюджетных высокоточных цифровых видеоинклинометров. *Тюменский индустриальный университет*. – Тюмень, 2024. С. 182–186.
16. Vertical movement sensor on CV. Онлайн-ресурс. URL: <https://osf.io/na4fw>.
17. Датчик вертикальных перемещений оценка точности. Онлайн-документ. URL: <https://gist.github.com/ArtemMareev/c8fdf105235b5717c4ff45c90c0f1d57>.

REFERENCE

1. Chuvilova I. V., Kravchenko V. V. (2011). Integrated methods of reconstruction and modernization of mass residential development. *Academia. Arxitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, 3, 394–100 [in Russian].
2. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Falaleeva A. A., Badina S. V., et al. (2022) Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 112 (1), Pp. 231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
3. Hiller, B., Yambaev, Kh. K. (2016). Development and field tests of an automated deformation monitoring system. *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGIT]*, (1)(33), 48-61. EDN WDHJQH [in Russian].
4. Salnikov, V. G., Skripnikov, V. A., Skripnikova, M. A., Khlebnikova, T. A. (2018). Application of modern automated surveying instruments for monitoring hydrotechnical structures of hydroelectric power plants. *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGIT]*, 23(3), 108-124. EDN YAATIT [in Russian].
5. Kosarev, N. S. (2025). On the necessity of creating russian software for automated geodetic monitoring. *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGIT]*, 30(3), 5-14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14. EDN DXVPUI [in Russian].
6. Zhuang Y., Chen W., Jin T., Chen B., Zhang H., Zhang W. (2022) A review of computer vision-based structural deformation monitoring in field environments. *Sensors*, 22(10), P. 3789. – DOI: 10.3390/s22103789.
7. Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. (2023). Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications. *Signals*, 4(3), pp. 539–574. – DOI: 10.3390/signals4030029.
8. Stepanov V. A., Moos E. N., Shadrin M. V., Savin M. V., Umnyashkin V. N., Umnyashkin A. V. (2020). Triangulation Sensor for Measuring Displacements and High-PRECISION Monitoring of Production Performance. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 13(1), pp. 54–65. DOI: 10.18721/JPM.13105.
9. Ryabov G. G., Ushakevich A. N. (2013). Automation of monitoring of deformations of hydraulic structures of water transport. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo*

flota im. admiral S. O. Makarova. [Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping], 2 (21), 95–102. [in Russian].

10. Artese G., Perrelli M., Artese S., Meduri S., Brogno N. (2015). POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests. *Sensors*, 15 (5), pp. 10806–10824. – DOI: 10.3390/s150510806.

11. Vicente M. A., Gonzalez D. C., Minguez J., Schumacher T. (2018). A Novel Laser and Video–Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections. *Sensors*, 18 (4), P. 970. – DOI: 10.3390/s18040970.

12. Cao J., Chen Y., Yu D., Xu Z., Hu X., Liang Y., Pan S., Wu D. (2023). Real–time laser spot detection and tracking system based on parallel multi–target detection and determination algorithm. *Review of Scientific Instruments*. 94, DOI: 10.1063/5.0157141.

13. Brown N., Schumacher T., Vicente M. A. (2021). Evaluation of a novel video– and laser–based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(2), pp. 265–281. DOI: 10.1007/s13349–020–00450–z.

14. Avkhadeev V. G., Mozharov G. A., Savostin P. I., Chugreev I. G., Skripitsina T. N., Zolotov A. A. (2019). Laser measuring scanning system for determining critical deformations of linear objects *Izvestiya vuzov "Geodeziya I aerofotos"emka" [Izvestia Vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"]*, 63(6), 636–644. DOI: 10.30533/0536–101X–2019–63–6–636–644 [in Russian].

15. Yangalyshev V. R., Popkov M. A., Naumov V. Yu. (2024). Program for calibration of low–budget high–precision digital video inclinometers. *Tyumenskij industrial'nyj universitet [Tyumen Industrial University]*, 182–186 [in Russian].

16. Vertical movement sensor on CV Retrieved from <https://osf.io/na4fw>.

17. Vertical displacement sensor accuracy assessment Retrieved from <https://gist.github.com/ArtemMareev/c8fdf105235b5717c4ff45c90c0f1d57>.

Об авторах

Арте́м Влади́мирович Ма́реев – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, старший научный сотрудник НИР раздела 01-10.

Максим Андреевич Попков – инженер НИР раздела 01-10.

Янгальшев Валентин Рамильевич – аспирант, инженер НИР раздела 01-10.

Мамаев Даниил Станиславович – аспирант, инженер НИР раздела 01-10.

Author details

Artem V. Mareev – PhD, Assistant Professor, Department of Space and Physical Geodesy; Senior Researcher.

Maxim A. Popkov – Research Engineer.

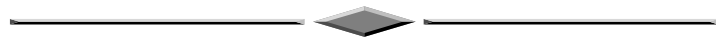
Valentin R. Yangalyshev – PhD Student, Engineer.

Daniil S. Mamaev – PhD Student, Engineer.

Получено / Received 07.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 16.09.2025

Принята к публикации / Accepted 23.10.2025



УДК 528.71:551.345

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-43-52>

Выявление и классификация криогенных процессов по данным космической съемки

А. А. Ильченко¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: ilchenco.a@gubkin.ru

Аннотация. В условиях глобального изменения климата и активного освоения арктических территорий актуальным становится оперативный мониторинг мерзлотных явлений, способствующий снижению рисков разрушения инфраструктуры и деградации природных экосистем. В статье рассмотрена проблема выявления и классификации криогенных процессов в регионах вечной мерзлоты с использованием материалов спутниковой съемки. Объектом исследования выступают криогенные процессы, проявляющиеся в мерзлотных ландшафтах, а предметом — методы обработки и анализа космических данных для их выявления. В работе применена авторская методика автоматизированной обработки спутниковых снимков, включающая этапы отбора данных, их предварительной обработки, сегментации и классификации криогенных процессов, а также создание тематических карт. Использованы данные спутников Landsat-7 ETM+ и Sentinel-2, что обеспечило высокое пространственное и спектральное разрешение. Результаты исследования позволили выделить основные типы криогенных процессов на территории Надымского района ЯНАО и создать авторские картосхемы их пространственного распределения. Полученная методика продемонстрировала высокую эффективность и точность в идентификации эрозионных и других мерзлотных явлений. Основным вывод состоит в том, что использование космических данных и разработанных методов существенно повышает качество мониторинга вечномерзлотных территорий, что имеет важное практическое значение для обеспечения устойчивого развития и безопасности инфраструктуры в арктических регионах.

Ключевые слова: криогенные процессы, дешифрирование космических изображений, картографирование мерзлотных ландшафтов, автоматизированная обработка, сегментация изображений, классификация эрозионных процессов, мониторинг природных изменений

Для цитирования:

Ильченко А. А. Выявление и классификация криогенных процессов по данным космической съемки. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 43–52. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-43-52>

Detection and classification of cryogenic processes from satellite remote sensing data

A. A. Ilchenko¹✉

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

e-mail: ilchenko.a@gubkin.ru

Abstract. Amid accelerating global climate change and intensive Arctic development, operational monitoring of permafrost phenomena is increasingly vital to mitigate infrastructure damage and ecosystem degradation risks. The study addresses the detection and classification of cryogenic processes in permafrost regions using satellite remote sensing data, focusing on processes within permafrost landscapes and associated analytical methodologies. An original automated processing workflow was developed, incorporating data selection, preprocessing, segmentation, cryogenic process classification, and thematic map production. High-resolution multispectral imagery from Landsat-7 ETM+ and Sentinel-2 enabled identification of dominant cryogenic process types in the Nadymsky District, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, with novel maps depicting their spatial distribution. The methodology exhibited high efficiency and accuracy in delineating erosional and other permafrost features. The obtained results highlight the substantial improvements in permafrost monitoring achievable through integrated satellite data and advanced analytics, with profound implications for sustainable Arctic development and infrastructure resilience.

Keywords: cryogenic processes, space image interpretation, mapping of permafrost landscapes, automated processing, image segmentation, classification of erosion processes, monitoring of natural changes

For citation:

Ilchenko A. A. (2026). Detection and classification of cryogenic processes from satellite remote sensing data. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 43–52. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-43-52>

Введение

Арктика – один из самых перспективных регионов планеты. С началом разработки месторождений углеводородов естественные ландшафты района вечной мерзлоты стали претерпевать изменения. Последние десятилетия ученые всего мира фиксируют резкие изменения климата, это коснулось и территорий арктического шельфа России. Проследить четкую связь интенсивной добычи нефти и газа в районе вечной мерзлоты с потеплением климата весьма трудно, но можно предположить, что для Арктики между этими процессами есть корреляция и она несет ряд негативных последствий [1].

На природные территории Арктики воздействуют различные факторы, среди которых антропогенное влияние на криолитозону, которое способно вызвать катастрофические изменения, включая:

- активизацию геологических процессов, таких как солифлюкция, карстообразование, проседание грунтов, морозное пучение, термоэрозия и другие;
- повышение уровня мирового океана, вызывающее затопления прибрежных зон;
- возникновение неорганизованных источников выброса метана, образующегося вследствие деградации вечной мерзлоты;
- изменение и деградацию экосистем, что ведет к потере биологического разнообразия;
- разрушение и снижение устойчивости существующих инженерных сооружений и инфраструктурных объектов [2].

Неслучайно активизацию геологических процессов выделяют в качестве приоритетной проблемы, поскольку именно они в последнее время оказывают значительное негативное влияние на человеческую дея-

тельность. Проявления этих процессов приводят к сокращению пригодных для хозяйственного освоения территорий, разрушению инфраструктурных объектов и создают повышенный риск для здоровья населения в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [3]. В этой связи проведённое исследование приобретает особую ценность, так как способствует своевременному выявлению эрозионных процессов в мерзлотных ландшафтах, что является важным шагом для предупреждения негативных последствий и обеспечения устойчивого развития регионов вечной мерзлоты.

Изучение криогенных процессов в регионах с вечной мерзлотой приобретает всё большую значимость в связи с изменениями климата и активным развитием промышленной деятельности на севере. Криогенные явления, такие как морозное пучение, термокарст, эрозия мерзлоты, оказывают существенное воздействие на ландшафт и инфраструктуру, что требует точного и своевременного мониторинга [4]. Традиционные методы полевого исследования зачастую ограничены труднодоступностью территорий и высокими затратами, что стимулирует поиск эффективных дистанционных технологий наблюдения [5]. Поэтому целью данного исследования является разработка и апробация методики выявления и классификации криогенных процессов на основе анализа спутниковых данных, обеспечивающей точное и оперативное картографирование мерзлотных явлений для повышения эффективности мониторинга и управления природными и техногенными рисками в регионах вечной мерзлоты [6].

Методы и материалы

Для достижения поставленных целей в данной работе использовался комплекс со-

временных методов дистанционного зондирования и геоинформационного анализа, позволяющих эффективно выявлять и классифицировать криогенные процессы на территориях вечной мерзлоты [7]. В качестве основных материалов исследования применялись спутниковые снимки с высоким пространственным и спектральным разрешением, обеспечивающие детальное отображение состояния поверхности. В частности, использовались данные спутников Landsat-7 ETM+ и Sentinel-2, которые обладают необходимыми характеристиками для выявления особенностей мерзлотных ландшафтов и динамики криогенных явлений [8].

В настоящее время разработаны методики автоматизированного геоинформационного картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли, в которых подробно описываются общие принципы построения тематических карт и обработки спутниковой информации [9]. Однако до настоящего времени отсутствовали специализированные методики, направленные именно на обработку и анализ материалов космической съёмки, связанных с выявлением и классификацией криогенных процессов. Это обуславливает актуальность и необходимость разработки адаптированных подходов, учитывающих специфику мерзлотных ландшафтов и характерные признаки криогенных явлений для повышения точности и достоверности картографирования в арктических регионах.

Разработанная методика обработки материалов космической съёмки включала несколько ключевых этапов, которые представлены на рис. 1. Данная методика включает последовательные этапы отбора, обработки и анализа спутниковых данных, что позволяет эффективно детектировать и классифицировать признаки мерзлотных явлений на исследуемой территории.

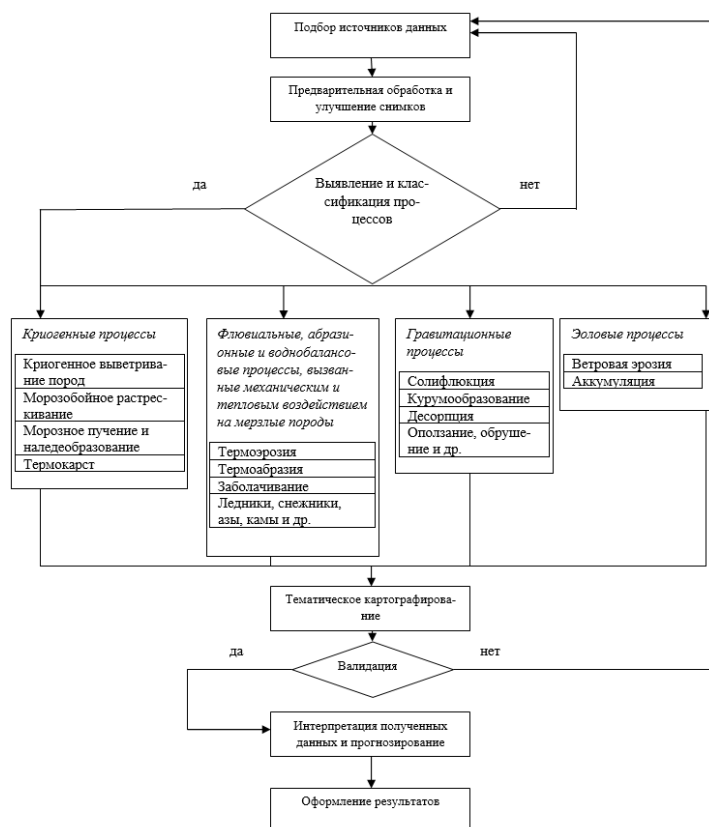


Рис. 1. Общий метод обработки космических снимков криогенных процессов

В рамках данного исследования была разработана технологическая схема обработки материалов космической съемки, применяемая на примере Надымского района, с целью обеспечения эффективного картографирования криогенных процессов (рис. 2). Территория исследования избрана не случайно, поскольку экономическое значение Надымского района как для страны, так и для региона в значительной степени обусловлено добычей и транспортировкой природного газа и нефти [10]. Примечательно, что около 30 % общего объема газа, добываемого в России, приходится на территорию Надымского района.



Рис. 2. Технологическая схема обработки материалов космической съемки при картографировании криогенных процессов

Данная технологическая схема включает в себя этапы предварительного отбора данных с учетом сезонных и метеоусловий, что позволяет минимизировать влияние облачности и снежного покрова на качество спутниковых изображений. Особое внимание уделяется применению методов спектрального анализа и фильтрации, направленных на выделение характерных признаков криогенных процессов, таких как термокарст, солифлюкция и термоэрозия [11].

Автоматизированная классификация с использованием алгоритма максимального правдоподобия позволяет повысить точность выделения различных типов мерзлотных явлений и обеспечить систематизацию полученных данных [12]. Итоговые тематические карты, созданные на основе данной методики, служат важным инструментом для мониторинга состояния мерзлотных ландшафтов и принятия обоснованных решений в области природопользования и инфраструктурного планирования [13]. Таким образом, разработанная методика обработки материалов космической съемки обеспечивает комплексный подход к изучению криогенных процессов и обладает высоким потенциалом для применения в арктических регионах с учетом их специфических природных и техногенных условий.

Результаты

В исследовании применялось визуальное дешифрирование криогенных процессов, поскольку не ставилась задача определения их происхождения — природного или антропогенного. Вместе с тем, следует учитывать, что неоднозначность ландшафтной индикации мерзлотных условий может существенно влиять на оценку устойчивости одинаковых по типу ландшафтов к техногенным воздействиям, учитывая различия в их мерзлотных характеристиках [14].

В результате апробации разработанной методики была создана серия тематических карт криогенных процессов, приуроченных к ландшафтам Надымского района. Процесс создания карт включал несколько последовательных этапов.

1. Сбор и подготовка картографической информации и дополнительных материалов,

включая выбор спутниковых снимков бесснежного периода с минимальной облачностью для обеспечения максимального качества исходных данных.

2. Визуальное дешифрирование полученных изображений с целью предварительного выявления характерных признаков криогенных процессов.

3. Определение эталонных участков для обучения классификатора с использованием метода максимального правдоподобия.

4. Создание карты классификации мерзлотного ландшафта на основе автоматизированной обработки спутниковых данных.

Изначально для исследования были отобраны спутниковые снимки исследуемого района бесснежного периода с минимальной облачностью (рис. 3).

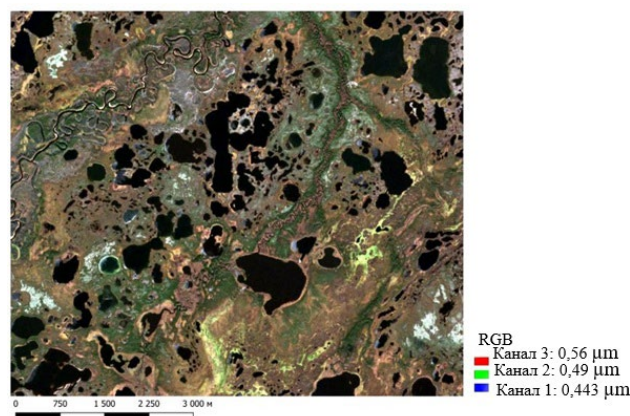


Рис. 3. RGB – снимок южной части Надымского района (за 16.09.2017 г.)

На этапе визуального дешифрирования были выделены основные криогенные процессы в районе исследования:

1. Морозобойное растрескивание и криогенное выветривание.
2. Морозное пучение.
3. Термокарст.
4. Солифлюкция.
5. Термоабразия.
6. Термоэрозия.
7. Заболачивание.

Далее была проведена классификация южной части Надымского района, для этого был использован безоблачный снимок 2017 г. и обрезан по границе исследуемого района (рис. 4).

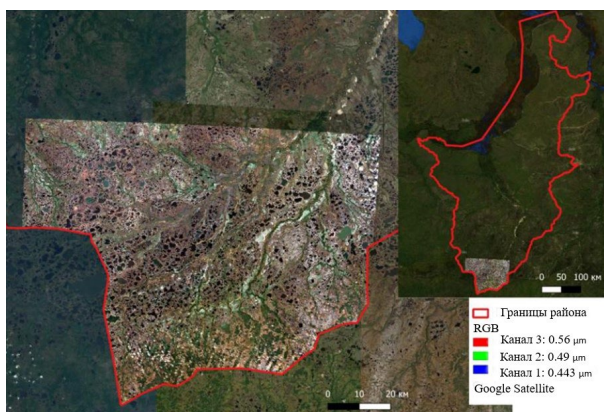


Рис. 4. Участок на юге Надымского района, снимки Sentinel-2

При работе с классификацией на спутниковых снимках отчетливо выделялись эоловые процессы, что послужило основанием для включения их в состав исследования. Для дальнейшего анализа был создан RGB-образ путем синтеза 2-, 3- и 4-го спектральных каналов. Классификация выполнялась методом максимального правдоподобия (Maximum Likelihood) с использованием программного обеспечения QGIS на основе заданных параметров (эталонов), соответствующих выделяемым классам (эталонам):

1. Болота.
2. Солифлюкция.
3. Лесной массив.
4. Термоэрозия.
5. Бугры пучения.
6. Термокарст.
7. Болотная растительность.
8. Эоловые процессы.

Для работы были взяты исходные космические снимки, представленные на рис. 5, 6.

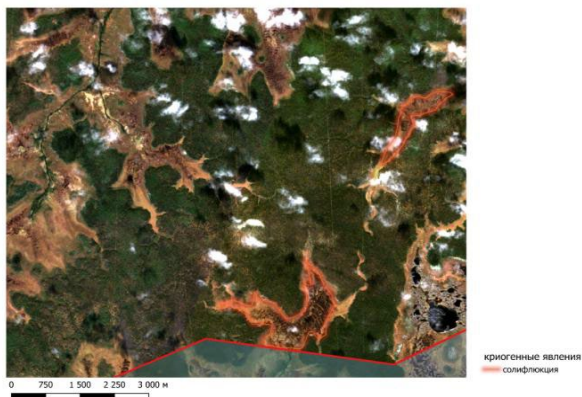


Рис. 5. RGB – снимок солифлюкции и облачности

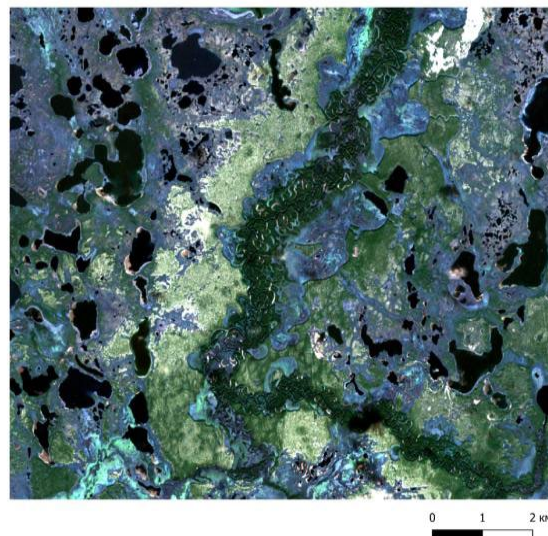


Рис. 6. RGB – снимок термоэрозии и речной долины

В результате апробации разработанной методики была создана серия тематических карт, которые, однако, обладают рядом недостатков, требующих дальнейшей доработки. К основным проблемам относятся наличие помех и шумов на спутниковых снимках (рис. 7), некорректный выбор масштаба картографирования (рис. 8), что в совокупности приводит к снижению качества классификации криогенных процессов. Устранение этих недостатков является важным шагом для повышения точности и надежности картографических материалов в последующих исследованиях.

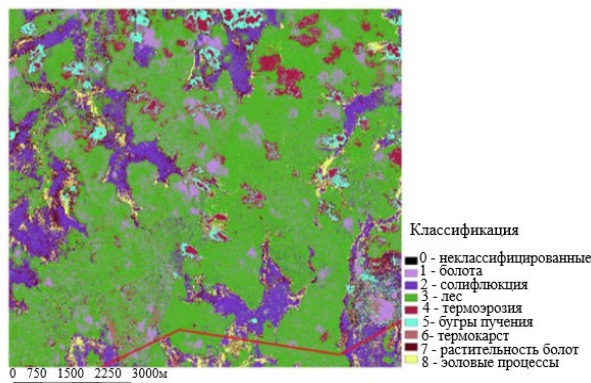


Рис. 7. Классификация, при которой облачность определена в категорию болот

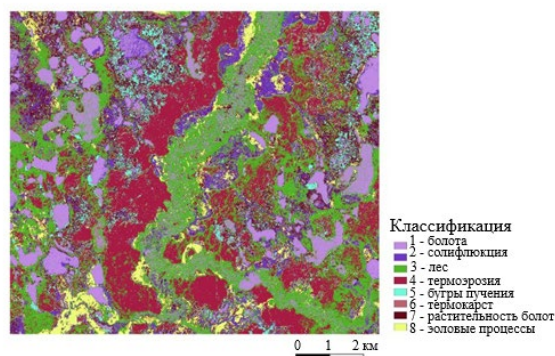


Рис. 8. Классификация, при которой термоэрозией выделена растительность

Обсуждение

Полученные в ходе исследования результаты показывают, что разработанная методика обработки материалов космической съемки для выявления и классификации криогенных процессов на территории Надымского района обладает недостаточной эффективностью. Созданные тематические карты позволили визуализировать пространственное распределение основных мерзлотных явлений с достаточно низкой достоверностью — в пределах 60–70 %. Тем не менее, в процессе анализа были выявлены участки с повышенной активностью эрозионных процессов, что является важной информацией для мониторинга состояния вечномерзлотных ландшафтов и планирования инженерных мероприятий.

Низкий уровень достоверности классификации обусловлен рядом факторов, среди которых ключевыми являются ограниченность используемых дешифровочных признаков и неоптимальный выбор масштаба картографирования. Кроме того, наличие помех и шумов на спутниковых снимках негативно влияет на качество обработки и интерпретации данных.

Для повышения точности и надежности результатов необходимо дальнейшее совершенствование методики. В частности, следует расширить набор дешифровочных признаков, используемых для классификации эрозионных процессов, что позволит более полно охватить разнообразие криогенных явлений. Также важным направлением является подбор оптимального масштаба картографирования, адекватного масштабам проявления

криогенных процессов в регионе. Разработка и внедрение более совершенных алгоритмов фильтрации шумов и адаптивных методов классификации позволит существенно повысить качество тематических карт и достоверность получаемых данных.

Сравнение с результатами других авторов демонстрирует, что аналогичные сложности характерны для исследований в условиях вечной мерзлоты, где высокая динамичность и сложность ландшафтов требуют комплексных и гибких подходов к дистанционному зондированию [15]. Поэтому дальнейшая работа по улучшению методики будет способствовать развитию инструментов мониторинга и обеспечению устойчивого природопользования в арктических регионах.

Заключение

Изучение и мониторинг мерзлотных областей имеет все большее значение в свете изменения климата и его влияния на глобальные экосистемы. Эффективная методика обработки данных космических изображений, позволяющая составлять разномасштабные мерзлотные карты с элементами автоматизированного выделения криогенных процессов, становится необходимым инструментом для точного анализа и прогнозирования изменений в мерзлотных зонах [16]. Развитие таких методик открывает возможности для более глубокого понимания динамики мерзлотных процессов и обеспечивает базу для разработки эффективных стратегий устойчивого управления экосистемами, подверженными воздействию криогенных явлений.

В данной статье рассмотрена разработка и апробация методики обработки материалов космической съемки для выявления и классификации криогенных процессов на территории Надымского района ЯНАО. Полученные результаты позволили создать серию тематических карт, отражающих пространственное распределение основных мерзлотных явлений и зон с повышенной активностью эрозионных процессов. Несмотря на достигнутые успехи, достоверность классификации находится в пределах 60–70 %, что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования предложенной методики.

Главным выводом исследования является осознание важности расширения набора дешифровочных признаков и выбора оптимального масштаба картографирования для повышения точности выявления и классификации криогенных процессов. Также критически важным является развитие более эффективных алгоритмов фильтрации шумов и адаптивных методов классификации данных спутниковой съемки.

Рекомендации по дальнейшим исследованиям включают интеграцию космических данных с полевыми наблюдениями и геофизическими методами, что позволит повысить достоверность и полноту мониторинга мерзлотных ландшафтов [15]. Кроме того, перспектив-

ным направлением является разработка универсальных методик, адаптируемых к различным арктическим регионам с учетом их специфики. Особое внимание следует уделять исследованию влияния антропогенных факторов и климатических изменений на динамику криогенных процессов.

В целом, применение дистанционного зондирования в сочетании с современными методами анализа данных открывает широкие возможности для устойчивого природопользования и обеспечения безопасности инфраструктуры в условиях вечной мерзлоты, что делает развитие данной области научных исследований актуальным и востребованным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврилов А. В. Методика и результаты геокриологического картографирования арктического шельфа в связи с перспективами его нефтегазового освоения. Наука, образование и духовность в контексте концепции устойчивого развития : материалы всероссийской научно-практической конференции (Ухта, 24–25 ноября 2016 г.). Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2017. С. 122–126.
2. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Моделирование мощности сезонноталого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей. Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 2. С. 3–10.
3. Шестакова А. А. Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере приленского плато): дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 2011. 162 с.
4. Самсонова В. В., Шепелев А. Г., Иванова Р. Н., Сантаева В. А., Никитин Н. И., Митрофанов А. Г. Мерзлотные ландшафты и условия участков с активизацией криогенных процессов в нижнем течении Лены. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2019. № 2 (14). С. 15–31.
5. Малинников В. А. Шаров А. И. Спутниковое дистанционное зондирование высокоширотной Арктики: проблемы и возможности. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1996. № 3. С. 9–16.
6. Осадчая Г. Г. Мерзлотные ландшафты Большеземельской тундры как основа рационального природопользования: дис. ... докт. геогр. наук. Ухта, 2018. 322 с.
7. Зотова Л. И. Методология оценки и картографирования мерзлотно-экологического состояния ландшафтов Тюменского Севера. Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции (Тюмень, 21-27 августа 2017 г.). Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2017. С. 143–145.
8. Калиничева С. В. Выявление и картографирование мерзлых и талых пород с использованием космических снимков в горных районах криолитозоны (на примере Олекмо-Чарского нагорья в Южной Якутии). ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 2. С. 71–82.
9. Майоров А. А., Каримова А. А. Общая методика автоматизированного геоинформационного картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63, № 2. С. 234–240.
10. Москаленко Н. Г., Казанцева Л. А., Матыщак Г. В., Орехов П. Т., Пономарева О. Е., Устинова Е. В. Мониторинг геокриологических и ландшафтных условий в полосе трассы газопровода Надым-Пунга. Материалы международной конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения (Тюмень 21-24 апреля 2008 г.). Тюмень, 2008. С. 192–195.

11. Корниенко С. Г. Характеристика современных трансформаций криогенных ландшафтов по данным дистанционного зондирования. Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике (Салехард, 03–12 ноября 2021 г.) Салехард, 2021. С. 206–209.
12. Каримова А. А. Разработка методики автоматизированного геоинформационного картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли: дис. кандидата технических наук. Москва, 2019. 110 с.
13. Федоров А. Н., Шестакова А. А., Торговкин Я. И., Васильев Н. Ф. Цифровое тематическое картографирование современного состояния мерзлотных ландшафтов в Якутии. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2019 (2) С. 36–49.
14. Тумель Н. В., Зотова Л. И. Неоднозначность ландшафтной индикации мерзлотных условий в различных масштабах картографирования криолитозоны России. Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. Москва. 2018. С. 234–240.
15. Мельников В. П., Скворцов А. Г., Малкова Г. В. [и др.] Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов. Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 171–180.
16. Малышева Н. В. Основы автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков лесов с использованием ГИС : учебное пособие. М.: МЭСХ, 2018. 136 с.

REFERENCES

1. Gavrilov, A.V. (2017). Methods and results of geocryological mapping of the Arctic shelf in connection with the prospects for its oil and gas development. *In Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Nauka. obrazovaniye i dukhovnost v kontekste kontseptsii ustoychivogo razvitiya. [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference: Science, Education, and Spirituality in the Context of the Concept of Sustainable Development]* (pp. 122–126). Ukhta: Ukhtinskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [in Russian].
2. Anisimov, O. A. Kokorev, V. A (2017). Modeling the thickness of the seasonal snow cover, taking into account climate and vegetation changes: a forecast for the middle of the 21st century and an analysis of uncertainties. *Kriosfera Zemli [Kriosfera Zemli.]*, Vol. 21. No. 2, 3-10. [in Russian].
3. Shestakova, A. A. (2011). *Kartografirovaniye merzlotnykh landshaftov s uchetom suksessiy rastitelnosti (na primere prilenskogo plato). [Mapping of permafrost landscapes taking into account vegetation succession (using the example of the Pri-Lena Plateau)]* Candidate's thesis. Yakutsk. [in Russian].
4. Samsonova, V. V., Shepelev, A. G., Ivanova, R. N., Santaeva, V. A., Nikitin, N. I., & Mitrofanov, A. G. (2019). Merzlotnye landshafty i usloviya uchastkov s aktivizatsiyey kriogennykh protsessov v nizhnem techenii Leny. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova. Seriya "Nauki o Zemle" [Vestnik of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov. Earth Sciences Series]*, 2(14), 15–31. [in Russian]
5. Malinnikov, V. A. Sharov A. I (1996). Permafrost landscapes and conditions in areas with active cryogenic processes in the lower reaches of the Lena River. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*, No. 3, 9–16 [in Russian]
6. Osadchaya, G. G. (2018). Merzlotnyye landshafty Bolshezemelskoy tundry kak osnova ratsionalnogo prirodopolzovaniya [Permafrost landscapes of the Bolshezemelskaya tundra as a basis for rational nature management: doctoral dissertation]. *Candidate's thesis*. Ukhta [in Russian].
7. Zotova, L. I. (2017) Methodology for assessing and mapping the permafrost-ecological state of landscapes in the Tyumen Nort. *In Materialy XII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii: Landshaftovedeniye: teoriya. metody. landshaftno-ekologicheskoye obespecheniye prirodopolzovaniya i ustoychivogo razvitiya [Materials of the XII International Landscape Conference: Landscape Studies: Theory and Methods. Landscape and Ecological Support for Nature*

Management and Sustainable Development] (pp. 143-145). Tyumen: Izdatelstvo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta.. [in Russian].

8. Kalinicheva, S. V. (2018) Identification and mapping of frozen and thawed rocks using space images in mountainous areas of the permafrost zone. *InterKarto. InterGIS [InterKarto. InterGIS]*, Vol. 24. No. 2, 71-82. [in Russian].

9. Mayorov, A.A. (2019). General methodology for automated geoinformation mapping based on Earth remote sensing data // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka. [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka]*, Vol. 63. No. 2, 234-240 [in Russian].

10. Moskalenko, N. G., Kazantseva, L. A., Matyshchak, G. V., Orekhov, P. T., Ponomareva, O. E., Ustinova, E. V. (2008) Monitoring geokriologicheskikh i landshaftnykh usloviy v polose trassy gazoprovoda Nadym-Punga. In *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Kriogennyye resursy polyarnykh i gornykh regionov. Sostoyaniye i perspektivy inzhenernogo merzlotovedeniya» [Materials of the International Conference "Cryogenic Resources of Polar and Mountain Regions. State and Prospects of Engineering Permafrost Science]* (pp. 192-195). Tyumen [in Russian].

11. Korniyenko, S. G. (2021). Characteristics of modern transformations of cryogenic landscapes based on remote sensing data. *Sovremennyye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoy bezopasnosti sooruzheniy v Arktike. [Conference materials: Modern Research on the Transformation of the Cryosphere and Geotechnical Safety of Structures in the Arctic]* (pp. 206-209). Salekhard [in Russian].

12. Karimova, A. A. (2019) *Razrabotka metodiki avtomatizirovannogo geoinformatsionnogo kartografirovaniya na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zeml [Development of an automated geoinformation mapping methodology based on Earth remote sensing data]. Candidate's thesis. Moskva [in Russian].*

13. Fedorov, A. N., Shestakova, A. A. Torgovkin, Ya. I., Vasilyev, N. F. (2019) Digital thematic mapping of the current state of permafrost landscapes in Yakutia. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M. K. Ammosova Seriya «Nauki o Zemle». [Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences]* (2) Pp. 36–49. [in Russian].

14. Tumel, N. V., Zotova, L. I., (2018) Ambiguity of landscape indication of permafrost conditions at different scales of mapping the cryolithozone of Russia. *Inzhenernyye izyskaniya v stroitelstve. Materialy dokladov Chetyrnadtsatoy Obshcherossiyskoy konferentsii izyskatelskikh organizatsiy. [Materials of the Fourteenth All-Russian Conference of Surveying Organizations Engineering Surveys in Construction]* (pp. 234-240). Moskva. [in Russian].

15. Melnikov, V. P., Skvortsov, A. G., Malkova, G. V. et. al. (2010). Results of studying the geocryological conditions of the Arctic territories using seismic methods. *Geologiya i geofizika [Geologiya i geofizika]*, Vol. 51., No. 1, 171-180. [in Russian].

16. Malysheva, N. V. (2018). *Osnovy avtomatizirovannogo deshifirovaniya aerokosmicheskikh snimkov lesov s ispolzovaniyem GIS [Fundamentals of Automated Decoding of Aerial and Space Images of Forests Using GIS]*. Moskva: Redaktsiya zhurnala "Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva". 136 p. [in Russian].

Об авторах

Анжела Асхатовна Ильченко – старший преподаватель кафедры геоэкологии

Author details

Angela A. Ilchenko – Senior Lecturer, Department of Geocology

Получено / Received 02.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2026

Принята к публикации / Accepted 02.02.2026

УДК 528.94: [630.162:502.17]

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-53-62>

Применение ГИС-технологий для оценки запасов углерода лесов, погибших от воздействия энтомовредителей

О. А. Слинкина^{1✉}, П. В. Михайлов¹, Д. А. Демидко¹

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация

e-mail: sloa@mail.ru

Аннотация. В аспекте глобальных климатических изменений, ассоциируемых с антропогенными эмиссиями парниковых газов, главной функцией лесных экосистем является поглощение углекислого газа из атмосферы и депонирование его в фитомассе. Выбросы парниковых газов, происходящие при гибели лесов, могут превращать их из поглотителя парниковых газов в источник. Для понимания поглотительной способности лесных экосистем необходимо оценить баланс между поглощением углерода и его эмиссией. Целью исследования являлась разработка методических подходов применения данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий (ГИС) для оценки запасов углерода, содержащихся в погибших деревьях. На основе данных съемки спутника Sentinel-2, информации таксационных описаний нарушенных участков леса, в ГИС сформирована карта пространственного распределения запасов углерода погибших насаждений. Объемные запасы мертвой древесины составили 8,08 млн м³, на площади 42,08 тыс. га, или, в среднем, 192 м³ га⁻¹. Потери составили 73 % от первоначальных запасов. Запасы углерода, сосредоточенные в погибших деревьях, составили 2,56 млн т. Средний запас углерода погибших насаждений составил 60,8 т га⁻¹. Распределение запасов углерода погибших по отдельным фракциям: стволы – 1,68 млн т (39,9 т га⁻¹), ветви – 0,28 млн т (6,5 т га⁻¹), корни – 0,48 млн т (11,4 т га⁻¹), листья/хвоя 0,12 млн т (3 т га⁻¹).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геоинформационные системы, углерод, энтомовредители, сибирский шелкопряд, погибшие лесные насаждения

Для цитирования:

Слинкина О. А., Михайлов П. В., Демидко Д. А. Применение ГИС-технологий для оценки запасов углерода лесов, погибших от воздействия энтомовредителей. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 53–62. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-53-62>

GIS-based assessment of carbon stocks in forests devastated by insect pests

О. А. Slinkina^{1✉}, P. V. Mikhailov¹, D. A. Demidko¹

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: sloa@mail.ru

Abstract. In the context of global climate change driven by anthropogenic greenhouse gas emissions, a primary function of forest ecosystems is the absorption of atmospheric CO₂ and its sequestration in biomass. Emissions of greenhouse gases resulting from forest dieback can transform these ecosystems from sinks to sources. Quantifying the balance between carbon uptake and emissions is thus critical for assessing forest carbon sequestration capacity. The objective of the study was to develop methodological approaches using remote sensing data and geographic information systems (GIS) to estimate carbon stocks in dead trees. Based on Sentinel-2 satellite imagery and taxation data from

disturbed forest areas, a GIS-based map depicting the spatial distribution of carbon stocks in deadwood was generated. Deadwood volume totaled 8.08 million m³ over 42,080 ha, averaging 192 m³ ha⁻¹. Losses represented 73% of the initial stocks. Total carbon stocks in dead trees amounted to 2.56 million tons, averaging 60.8 t ha⁻¹. The distribution of carbon stocks in dead biomass fractions was as follows: stems – 1.68 million t (39.9 t ha⁻¹), branches – 0.28 million t (6.5 t ha⁻¹), roots – 0.48 million t (11.4 t ha⁻¹), and leaves/needles – 0.12 million t (3.0 t ha⁻¹).

Keywords: remote sensing, geographic information systems, carbon, insect pests, Siberian silkworm, dead forest stands

For citation:

Slinkina O. A., Mikhailov P. V., Demidko D. A. (2026). GIS-based assessment of carbon stocks in forests devastated by insect pests. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 53–62. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-53-62>

Введение

Леса играют ключевую роль в процессах глобальных климатических изменений, поглощая углерод из атмосферы в размере порядка 15,6 млрд тонн CO₂ (4,25 млрд. тонн углерода) в год [1], компенсируя около 30 % антропогенных выбросов парниковых газов на планете [2]. Бореальные леса являются вторым по величине наземным биомом, составляя порядка 27 % площади мировых лесов. По данным на 2020 г. 73 % бореальных лесов произрастает на территории России [3], составляя 90 % лесного фонда нашей страны [4]. Однако негативные последствия изменения климата, такие как увеличение количества и площади лесных пожаров, ветровалов, вспышки размножения насекомых-энтомофитов, в сочетании с хозяйственной деятельностью человека, могут изменить роль лесов, превратив их из поглотителя углерода в источник.

Динамика климатических изменений на территории России отличается от среднемировой. По данным Росгидромета, темпы потепления на территории России примерно в 2,5 раза выше мировых и составляют за период 1976–2020 гг. 0,51 °C/10 лет (при росте глобальной температуры 0,18 °C/10 лет) [5]. Таким образом, бореальные леса, произрастающие на территории нашей страны, находятся в настоящее время в климатических условиях, способствующих увеличению частоты и площади вспышек массового размножения насекомых-энтомофитов [6–8].

Ежегодно на территории России энтомофитами повреждаются до 2 млн га лесов [9]. Повреждения ведут к массовым усыханиям древостоев и последующим эмиссиям углерода, депонированного в фитомассе, в атмосферу, в процессе разложения древесных остатков.

Количественная оценка запасов углерода, выделяющегося в атмосферу вследствие таких эмиссий, важна с точки зрения климатической политики, экологического мониторинга, устойчивого лесопользования. В том числе, она позволяет: определить вклад лесов в бюджет углерода и разработать подходы для усиления их поглощающей способности; оценить потенциал лесоклиматических проектов; адаптировать управление лесами к условиям меняющегося климата; может быть использована в глобальных климатических моделях для построения прогнозов и оценки эффективности стратегий буферизации климатических изменений.

Геоинформационные системы совместно с данными дистанционного зондирования широко применяются в оценке запасов и динамики углерода в лесах [10, 11], позволяя проводить обработку спутниковых снимков, моделирование углеродного баланса и картографирование результатов.

Цель исследования – разработка методических подходов и алгоритмов применения данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для оценки степени повреждений лесов энтомофитами, расчетов запасов углерода, содержащихся в погибших деревьях, что дает возможность

моделирования динамики эмиссий углерода в атмосферу, происходящих после гибели древостоя в процессе деструкции.

Методы и материалы

Исследование выполнено для участка темнохвойной тайги, расположенного на юге Красноярского края, на котором в период с 2018 по 2020 г. наблюдалась вспышка массового размножения сибирского шелкопряда *Dendrolimus sibiricus* – опасного хвоегрызущего вредителя, охватившая площадь более 40 тыс. га. В работе, выполненной на предыдущем этапе исследования, с применением данных дистанционного зондирования были определены границы и состояние поврежденных участков леса. По данным съемки Sentinel-2/MSI рассчитан ряд спектральных индексов и определено, что индекс NBR показывает максимальную из рассмотренных индексов корреляцию с данными наземных измерений ($R^2 = 0,85$). Получена линейная регрессионная модель, связывающая значения индекса NBR с количественными показателями поврежденных деревьев. В соответствии с регрессионной моделью проведен попиксельный пересчет значений индекса NBR в долю погибших деревьев, усредненную по площади пикселя. Таким образом, для всей территории исследуемого участка леса, поврежденного сибирским шелкопрядом, определена доля погибших деревьев в каждой элементарной области, с пространственным разрешением 10×10 метров. Результаты первого этапа работы опубликованы в [12].

На текущем этапе исследования, для оценки запасов углерода, содержащихся в поврежденных насаждениях, использованы данные лесной таксации. Изучаемый участок поврежденного шелкопрядом леса расположен в Кунгусском участковом лесничестве, на территории Ирбейского лесничества Красноярского края. Для данного участка леса получены лесоустроительные планшеты – карты-схемы с нанесенными границами и номерами таксационных кварталов и выделов. В геоинформационной системе QGIS были выполнены их географическая привязка и векторизация. В качестве атрибутивной информации

к каждому полигону таксационного выдела добавлены данные лесной таксации, необходимые для расчета запасов углерода: породный состав (перечень древесных пород выдела с долей каждой породы в общем запасе древесины), класс и группа возраста, средний запас древесины на 1 гектар (рис. 1).

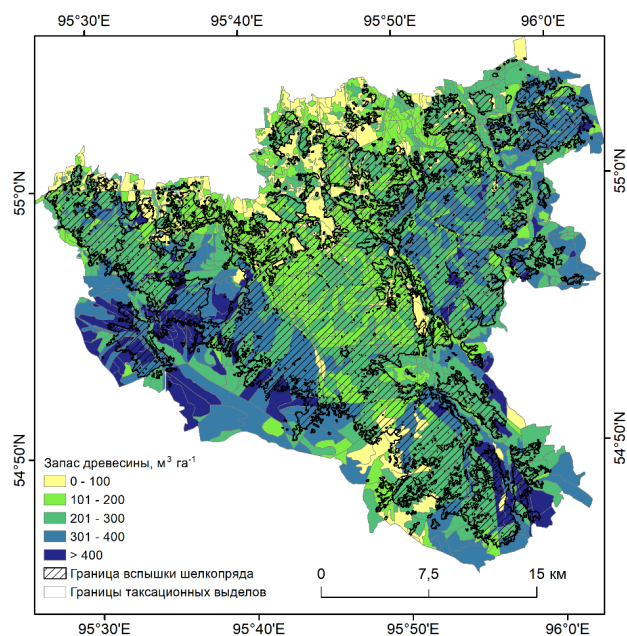


Рис. 1. Средний запас древесины таксационных выделов, нарушенных сибирским шелкопрядом

Полигональный векторный слой с таксационными показателями древостоев был пространственно пересечен со слоем, содержащим данные о доле погибших деревьев. Это позволило получить результирующий слой пространственных полигональных объектов, объединяющий атрибутивную информацию и границы двух пересекаемых слоев. Таким образом, для элементарных участков с пространственным разрешением 10×10 метров определено: общая доля погибших насаждений, общий запас древесины до воздействия сибирского шелкопряда, породный состав, группа возраста насаждений, площадь.

Для вычисления запасов углерода погибших насаждений был разработан алгоритм, реализованный в ГИС (рис. 2). При разработке алгоритма мы руководствовались описанными ниже соображениями.

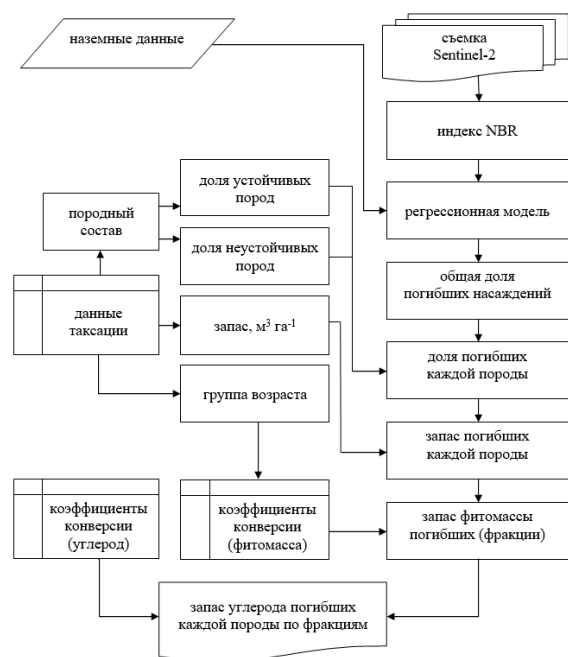


Рис. 2. Блок-схема вычисления запасов углерода, содержащихся в поврежденных сибирским шелкопрядом древостоях

Известно, что наиболее благоприятными кормовыми объектами для сибирского шелкопряда являются хвоя лиственницы, пихты, кедра сибирского, и, в меньшей степени, ели [13, 14]. Но при недостатке хвои на предпочитаемых шелкопрядом в качестве корма породах деревьев его гусеницы могут переходить к питанию другими хвойными [13]. Вероятность же гибели дефолированных деревьев, при прочих равных, зависит от их устойчивости к этому виду повреждения. Известно, что наименее устойчивыми являются темнохвойные виды (кедр, пихта, ель). Светлохвойные виды восстанавливают хвою быстрее, и поэтому лиственница, относящаяся к предпочитаемым сибирским шелкопрядом породам, как правило, восстанавливается после дефолиации. То же касается сосны в случае, если гусеницы *D. sibiricus* переходят на питание ее хвоей из-за истощения кормовой базы [13, 15, 16]. Данные о питании сибирским шелкопрядом на лиственных породах в известных нам источниках отсутствуют, но анализ данных перечёта деревьев в шелкопрядниках показывает, что в результате массового размножения сибирского шелкопряда, возможно, из-за его косвенных последствий, могут гибнуть и они

[16]. Факт гибели лиственных также подтверждается нашими собственными наблюдениями в ходе полевых работ в шелкопрядниках.

Исходя из этого, мы разделили все породы деревьев, встречающиеся в таксационных описаниях, на два класса – неустойчивые (интенсивно повреждаемые и плохо восстанавливающиеся после дефолиации) и устойчивые. К неустойчивым отнесены пихта, кедр и ель. К устойчивым – лиственница, сосна, осина, береза. В случае, если доля погибших насаждений не превышала долю неустойчивых пород на выделе, мы считали, что повреждаются только неустойчивые породы, весь запас отмершей древесины сосредоточен в них и разделен между ними в равной пропорции. Если доля погибших превышала долю неустойчивых, то погибшими считались все неустойчивые породы, а также часть устойчивых. Доля погибших деревьев устойчивых видов в таком случае распределялась между ними пропорционально их доле по запасу в древостое. Таким образом, для каждой древесной породы произрастающей в границах каждого полигона согласно данным таксации, была определена доля погибших насаждений. Объемный запас древесины, содержащейся в погибших деревьях, определялся по формуле:

$$M_i = F_i \cdot S \cdot V,$$

где M_i – объемный запас древесины погибших насаждений породы i , м^3 ,

F_i – доля погибших насаждений породы i ,
 S – площадь полигона, га,

V – объемный запас древесины на выделе по данным таксации, $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$.

Для определения запасов углерода, содержащихся в погибших насаждениях, сначала проведен пересчет запасов древесины из объемных единиц в единицы массы (фитомассы). После этого запасы фитомассы конвертировались в запасы углерода. Расчет запасов фитомассы производился с использованием коэффициентов конверсии, разработанных для основных лесообразующих пород России с учетом климатических зон [17]. В настоящей работе применялись коэффициенты для семи древесных пород, подзоны южной тайги (таблица). Запас фитомассы определялся с учетом

ее фракционной структуры (стволы, ветви, корни, листва/хвоя). Формула для определения запасов фитомассы отдельных фракций имела следующий вид:

$$Ph_{ijk} = M_{ij} \cdot K_{ijk},$$

где Ph_{ijk} – запас фитомассы погибших насаждений породы i группы возраста j фракции k , т;

M_{ij} – объемный запас древесины погибших насаждений породы i группы возраста j , м³;

K_{ijk} – коэффициент конверсии для породы i группы возраста j фракции k , т м⁻³.

Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесообразующих пород района исследования, т м⁻³

Порода	Группа возраста	Фракции			
		Стволы	Ветви	Корни	Листва/ хвоя
Сосна	Молодняки	0,426	0,092	0,134	0,074
	Средневозрастные	0,434	0,058	0,109	0,026
	Приспевающие	0,440	0,051	0,109	0,019
	Спелые и перестойные	0,445	0,053	0,117	0,117
Ель	Молодняки	0,398	0,126	0,147	0,140
	Средневозрастные	0,417	0,072	0,149	0,046
	Приспевающие	0,419	0,067	0,149	0,040
	Спелые и перестойные	0,424	0,059	0,161	0,032
Пихта	Молодняки	0,371	0,115	0,112	0,132
	Средневозрастные	0,365	0,067	0,083	0,046
	Приспевающие	0,365	0,061	0,079	0,036
	Спелые и перестойные	0,370	0,060	0,082	0,031
Лиственница	Молодняки	0,516	0,157	0,254	0,057
	Средневозрастные	0,490	0,062	0,166	0,017
	Приспевающие	0,486	0,048	0,150	0,012
	Спелые и перестойные	0,504	0,053	0,185	0,011
Кедр	Молодняки	0,414	0,136	0,191	0,093
	Средневозрастные	0,426	0,074	0,135	0,029
	Приспевающие	0,443	0,065	0,117	0,028
	Спелые и перестойные	0,460	0,062	0,108	0,033
Береза	Молодняки	0,524	0,118	0,244	0,057
	Средневозрастные	0,532	0,083	0,169	0,022
	Приспевающие	0,532	0,076	0,143	0,016
	Спелые и перестойные	0,527	0,083	0,137	0,015
Осина	Молодняки	0,403	0,093	0,305	0,065
	Средневозрастные	0,426	0,080	0,202	0,025
	Приспевающие	0,431	0,070	0,167	0,017
	Спелые и перестойные	0,444	0,069	0,135	0,012

Конвертация запасов фитомассы в запасы углерода производилась с применением следующих переводных коэффициентов: для фракций стволов, ветвей, корней – 0,5; для фракции листвы/хвои – 0,45 [18]. В результате создан векторный полигональный слой, содержащий расчеты попиксельных (пространственное разрешение 10 м) значений запасов углерода погибших древостоев.

Результаты и обсуждение

Для изучаемого участка леса, поврежденного вспышкой массового размножения си-

бирского шелкопряда, получена количественная оценка объемного запаса мертвой древесины, составившая 8,08 млн м³, или, в среднем, 192 м³ га⁻¹. С использованием коэффициентов конверсии объемные запасы древесины пересчитаны в единицы фитомассы, и, далее, в запасы углерода отдельных фракций. Для всей нарушенной территории запасы углерода, сосредоточенные в погибших деревьях, оцениваются в 2,56 млн тонн. Средний запас углерода погибших насаждений составляет 60,8 т га⁻¹. Распределение запасов углерода погибших по отдельным фракциям: стволы – 1,68 млн т (39,9 т га⁻¹), ветви – 0,28 млн т

(6,5 т га⁻¹), корни – 0,48 млн т (11,4 т га⁻¹), листья/хвоя 0,12 млн т (3 т га⁻¹). По результатам расчетов в ГИС сформирована карта пространственного распределения запасов углерода погибших насаждений (рис. 3).

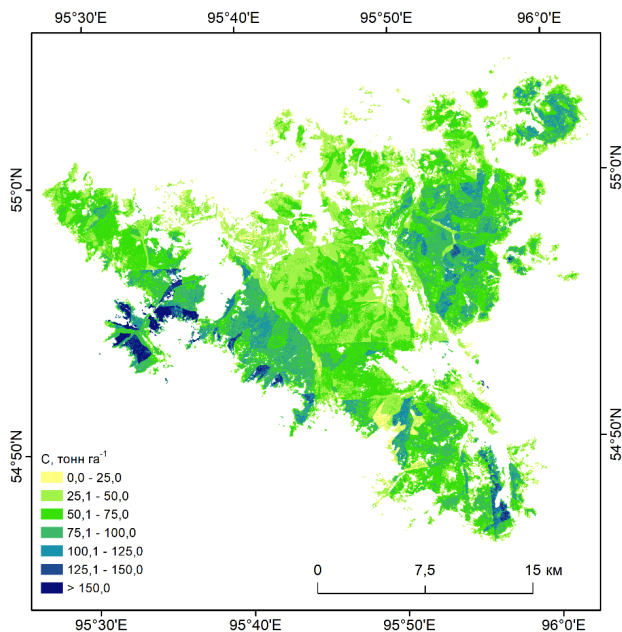


Рис. 3. Запасы углерода погибших насаждений (суммарно по всем фракциям)

Запасы древесины изучаемого участка леса по данным лесной таксации до повреждения сибирским шелкопрядом составляли 11,11 млн м³ на площади 42,08 тыс. га, или, в среднем 264 м³ га⁻¹. Таким образом, согласно расчетам, повреждение древостоев сибирским шелкопрядом привело к утрате порядка 73 % объемных запасов насаждения.

В работе [19] приведены оценки запасов сухостоя и валежа в шелкопрядниках Красноярского края, суммарно достигающие 250 м³ га⁻¹. В работе [20] приведены оценки запасов крупных древесных остатков в очагах сибирского шелкопряда для темнохвойных лесов Красноярского края, составляющие от 200 до 400 м³ га⁻¹. По нашим собственным оценкам, полученным в ходе проведенных на изучаемом участке леса полевых исследований [12], потери стволовой древесины относительно ее общего запаса составили для всех пробных площадей в среднем 252 м³ га⁻¹, при среднем запаса до нарушения 410 м³ га⁻¹, что в процентном соотношении составляет 61 % по-

терь объемного запаса древесины. Приведенные выше оценки согласуются с полученными нами в результате расчетов данными.

Депонированный в мертвой древесине углерод в процессе разложения древесных остатков будет высвобождаться в атмосферу в виде углекислого газа. Время разложения крупных древесных остатков (КДО) хвойных пород для южной тайги составляет 60–120 лет, для сухостоя и стволов, не лежащих на земле, может достигать 300 лет [21, 22]. Время, соответствующее разложению КДО хвойных, уменьшается в ряду: ветви кедра > ветви ели и пихты > стволы кедра > стволы пихты > стволы ели [23].

Процессы разложения чаще всего описываются экспоненциальными моделями. По разным оценкам, скорость разложения КДО кедра – до 1 % в год, пихты и ели – до 2-3 %. Скорость разложения корней не зависит от древесной породы, и оценивается от 1 до 3,4 % в год [22–24].

Большая часть хвои погибших деревьев, попадая на поверхность почвы в виде отходов жизнедеятельности гусениц шелкопряда и опада, является наиболее мобильным субстратом для биологической трансформации. Так, спустя три месяца после гибели, теряется до 50 % запаса углерода зоогенного опада, более 90 % массы опада разлагается в первые два года после вспышки [25].

Таким образом, длительное время после гибели поврежденного шелкопрядом древостоя, в атмосферу, почву и воду будет высвобождаться накопленный древостоем углерод. Максимальные эмиссии будут наблюдаться первые десятилетия после вспышки, превращая углеродный баланс нарушенного участка леса из стока углерода в источник.

Заключение

Разработана методика применения данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для оценки повреждений лесов энтомовредителями, расчетов запасов углерода, содержащихся в погибших деревьях. Получены пространственно-распределенные оценки запасов углерода, депонированного в древостоях, погибших от вспышки массового размножения сибирского шелкопряда.

На точность полученных в данной работе оценок влияет ряд факторов. Ключевое допущение работы – разделение всех древесных пород на два класса устойчивости к воздействию шелкопряда (устойчивые и неустойчивые), с последующим пропорциональным распределением гибели внутри каждого класса. Данная модель является упрощением реальной экологической ситуации и используется в силу невозможности более точных оценок из-за влияния на смертность деревьев помимо принадлежности к определенной древесной породе слишком большого количества факторов: локальных лесорастительных условий, локального породного состава и плотности популяции гусениц шелкопряда, возраста конкретного дерева и наличия у него грибковых или вирусных заболеваний и т. д. Помимо этого точность оценок определяется: среднеквадратической ошибкой регрессионной модели, применяемой для расчета доли погибших деревьев по спутниковым снимкам (11,4 %); ошибкой определения объемных запасов древесины на выделе по данным таксации (согласно нормативам таксации лесов –

до 10 % [26]); точностью коэффициентов конверсии, применяемых при пересчете запасов насаждений в фитомассу (точность для стволов составляет 2,1 %, для ветвей 14,1 %, для корней 13,4 %, для листьев/хвои 17,1 % [17]).

Несмотря на имеющиеся допущения, проведенное исследование однозначно позволяет утверждать, что повреждение лесов сибирским шелкопрядом приводит к значительному перераспределению углерода из живой фитомассы в мертвую, меняя роль леса в процессе глобальных климатических изменений, превращая его из поглотителя углерода в источник.

Принимая во внимание скорости разложения КДО, можно прогнозировать, что в течение ближайших десятилетий шелкопрядники будут являться источником выбросов углерода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение коллективом научной лаборатории Защита леса проекта «Методологические основы оценки лесопатологических рисков в насаждениях юга Средней Сибири» (№ FEFE-2024-0016).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Harris N. L., Gibbs D. A., Vaccini A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*. 2021. V. 11. P. 234–240. DOI 10.1038/s41558-020-00976-6.
2. Bellassen V., Luyssaert S. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature*. 2014. V. 506. P. 153–155. DOI 10.1038/506153a.
3. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. FAO: Rome, 2020. DOI 10.4060/ca9825en.
4. Филипчук А. Н., Малышева Н. В., Золина Т. А., Югов А. Н. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата. Лесохозяйственная информация. 2020. № 1. С. 92–113. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10.
5. Глобальное изменение климата и Сибирский федеральный округ. На пути к адаптации. Климатический центр Росгидромета. СПб. : Наукоемкие технологии, 2021. 12 с.
6. Суховольский В. Г., Ковалев А. В., Пальникова Е. Н., Тарасова О. В. Моделирование рисков воздействия насекомых на лесные насаждения при возможных климатических изменениях. Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 2. С. 241–253. DOI 10.20537/2076-7633-2016-8-2-241-253.
7. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*. 2019. V. 35. P.103–108. DOI 10.1016/j.cois.2019.07.010.
8. Pureswaran D. S., Roques A., Battisti A. Forest Insects and Climate Change. *Current Forestry Reports*. 2018. V. 4. P. 35–50. DOI 10.1007/s40725-018-0075-6.
9. Исаев А. С., Ершов Д. В., Лупян Е. А., Кобельков М. Е. Особенности организации спутникового мониторинга массового размножения вредных насекомых в лесах Сибири. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. С. 164–174.

10. Ершов Д. В., Ковганко К. А., Сочилова Е. Н. ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-MODIS и государственного учета лесов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. С. 365–372.
11. Лукина Н. В., Барталев С. А., Лупян Е. А., Курбатова Ю. А., Ершов Д. В., Курганова И. Н., Шанин В. Н., Тебенькова Д. Н., Данилова М. А., Гераськина А. П., Тихонова. Е. В., Горнов А. В., Шевченко Н. Е. Создание национальной системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах России. Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: сб. науч. ст. по материалам VIII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 35-летию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Апатиты : Изд. ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 35–36.
12. Слинкина О. А. Определение состояния темнохвойных лесов, поврежденных энтомофагами, по спутниковым данным. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 51–61. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61.
13. Рожков А. С. Сибирский шелкопряд. М.: АН СССР, 1963. 175 с.
14. Кириченко Н. И., Баранчиков Ю. Н. Кормовые нормы гусениц сибирского шелкопряда на хвойных породах Сибири. Сибирский экологический журнал. 2008. Т. 5. С. 709–716.
15. Журавлев Г. П. Рекомендации по надзору за сибирским шелкопрядом в лесах Дальнего Востока. Хабаровск : ДальНИИЛХ, 1960. 33 с.
16. Гродницкий Д. Л., Разнобарский В. Г., Солдатов В. В., Ремарчук Н. П. Деградация древостоев в таёжных шелкопрядниках. Сибирский экологический журнал. 2002. № 1. С. 3–12.
17. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L. and Kraхner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*. 2018. V. 9, Iss. 6. 312. P. 1–23. DOI 10.3390/f9060312.
18. Уткин А. И., Замолотчиков Д. Г., Пряжников А. А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь). *Лесоведение*. 2003. № 1. С. 48–57.
19. Фуряев В. В. Шелкопрядники тайги и их выжигание. М. : Наука, 1966. 92 с.
20. Исаев А. С. Программа чрезвычайных мер биологического контроля насекомых-вредителей в лесах Красноярского края. Отчет по проекту Всемирного банка Loan 3806-RU. М., 1997. 151 с.
21. Стороженко В. Г. Структуры древесных фракций и объемы компонентов древесины еловых биогеоценозов тайги европейской России. *Сибирский лесной журнал*. 2022. № 2. С. 29–40. DOI 10.15372/SJFS20220204.
22. Russell M. B., Woodall C. W., Fraver S., D'amato A. W., Domke G. M., Skog K. E. Residence times and decay rates of downed woody debris biomass/carbon in eastern US forests. *Ecosystems*. 2014. V. 17. P. 765–777. DOI 10.1007/s10021-014-9757-5.
23. Капица Е. А., Трубицына Е. А., Шорохова Е. В. Биогенный ксилолиз стволов, ветвей и корней лесобразующих пород темнохвойных северотаежных лесов. *Лесоведение*. 2012. № 3. С. 51–58.
24. Shorohova E., Kapitsa E. The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species. *European Journal of Forest Research*. 2016. V. 135. P. 593–606. DOI 10.1007/s10342-016-0957-8.
25. Краснощеков Ю. Н., Вишнякова З. В., Перевозникова В. Д., Баранчиков Ю. Н. Эколого-биологические особенности почв шелкопрядников в южной тайге Средней Сибири. *Известия АН. Серия биологическая*. 2003. № 5. С. 623–631. DOI 10.1023/A:1025811022200.
26. Загребев В. В., Сухих В. И., Швиденко А. З., Гусев Н. Н., Мошкалев А. Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М. : Колос, 1992. 495 с.

REFERENCES

1. Harris N. L., Gibbs D. A., Vaccini A. et al. (2021) Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11, 234–240. DOI 10.1038/s41558-020-00976-6.
2. Bellassen V., Luysaert S. (2014) Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature*, 506, 153–155. DOI 10.1038/506153a.

3. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.* (2020) FAO: Rome. DOI 10.4060/ca9825en.
4. Filipchuk A. N., Malysheva N. V., Zolina T. A., Yugov A. N. (2020) Boreal forests of Russia: opportunities for climate change mitigation. *Lesohozyajstvennaya informaciya [Lesohoz. Inform.]*, 1, 92–113. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10. [in Russian].
5. Global climate change and the Siberian Federal District. Towards adaptation (2021) *Klimaticheskij centr Rosgidrometa [Climate Center of Roshydromet]*. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2021. [in Russian].
6. Soukhovolsky V. G., Kovalev A. V., Palnikova E. N., & Tarasova O. V. (2016). Modelling the risk of insect impacts on forest stands after possible climate changes. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Studies and Modelling]*, 8(2), 241–253. DOI 10.20537/2076-7633-2016-8-2-241-253 [in Russian].
7. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. (2019) Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103–108. DOI 10.1016/j.cois.2019.07.010
8. Pureswaran D. S., Roques A., Battisti A. (2018) Forest Insects and Climate Change. *Current Forestry Reports*, 4, 35–50. DOI 10.1007/s40725-018-0075-6.
9. Isaev A. S., Ershov D. V., Lupyan E. A., Kobelkov M. E. (2004) Features of the organization of satellite monitoring of mass reproduction of harmful insects in the forests of Siberia. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 1, 164–174. [in Russian].
10. Ershov D. V., Kovganko K. A., Sochilova E. N. (2009) GIS technology for assessing pyrogenic carbon emissions based on Terra-MODIS and state forest inventory data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 2, 365–372. [in Russian].
11. Lukina N. V., Bartalev S. A., Lupyan E. A., Kurbatova Yu. A., Ershov D. V., Kurganova I. N., Shanin V. N., Tebenkova D. N., Danilova M. A., Geraskina A. P., Tikhonova. E. V., Gornov A. V., Shevchenko N. E. (2024) Creation of a national system for monitoring carbon pools and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems of Russia. *Ekologicheskie problemy severnyh regionov i puti ih resheniya: sb. nauch. st. po materialam VIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 300-letiyu Rossijskoj akademii nauk i 35-letiyu Instituta problem promyshlennoj ekologii Severa KNC RAN [Environmental problems of the northern regions and ways to solve them: Proceedings of the VIII All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 35th anniversary of the Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Center of the RAS]*. (pp. 35–36). Apatity: Изд. FRC KSC RAS Publ. [in Russian].
12. Slinkina O. A. (2024). Determining the state of dark coniferous forests damaged by insect pests according to satellite data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(2), 51–61. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61 [in Russian].
13. Rozhkov A.S. (1963) *Sibirskij shelkopryad [Siberian silkworm]*. Moscow: USSR AS Publ., 175 p. [in Russian].
14. Kirichenko N.I., Baranchikov Yu.N. (2008) Withdrawn Food Rate for the Larvae of Siberian Moth on the Conifers of Siberia. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 5, 709–716. [in Russian].
15. Zhuravlev G.P. (1960) *Rekomendacii po nadzoru za sibirskim shelkopryadom v lesah Dal'nego Vostoka [Recommendations for the Monitoring of the Siberian Silkworm in the Forests of the Far East]* Khabarovsk: Far Eastern Research Institute of Forestry Publ., 33 p. [in Russian].
16. Grodnitsky D. L., Raznobarsky V. G., Soldatov V. V., Remarchuk N. P. Degradation of Forest Stands in Taiga Silkworm Forests. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal (App.1) [Contemporary Problems of Ecology (Pril.1)]*, 1, 3–12. [in Russian].
17. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchik V., Dmitriev E., Martynenko O., See L. and Kraxner F. (2018) Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*, 9(6), 312, 23 p. DOI 10.3390/f9060312.

18. Utkin A. I., Zamolodchikov D. G., Pryazhnikov A. A. (2003) Methods for Determining Carbon Sequestration of Phytomass and Net Productivity of Forests (a case study of the Republic of Belarus). *Lesovedenie [Forestry]*, 1, 48–57. [in Russian].
19. Furyaev V. V. (1966). *Shelkopryadniki taygi i ikh vyzhiganie [Forests that Died after Siberian Silk Moth Outbreaks and Their Prescribed Burning]*. Moscow: Nauka Publ., 92 p. [in Russian].
20. Isaev A. S. (1997) Program of Emergency Measures for Biological Control of Insect Pests in the Forests of Krasnoyarsk Krai. *Otchet po proektu Vsemirnogo banka Loan 3806-RU [Report on the World Bank Project Loan 3806-RU]*. Moscow, 151 p. [in Russian].
21. Storozhenko V. G. (2022) Structures of wood fractions and volumes of wood components in spruce biogeocenoses of the taiga of European Russia. *Sibirskij Lesnoj Zurnal [Sib. J. For. Sci.]*, 2, 29–40. DOI 10.15372/SJFS20220204 [in Russian].
22. Russell M. B., Woodall C. W., Fraver S., D'amato A. W., Domke G. M., Skog K. E. (2014) Residence times and decay rates of downed woody debris biomass/carbon in eastern US forests *Ecosystems*, 17, 65–777. DOI 10.1007/s10021-014-9757-5.
23. Kapitsa E. A., Trubitsyna E. A., Shorokhova E. V. (2012) Biogenic xylolysis of trunks, branches and roots of forest-forming species of dark coniferous northern taiga forests. *Lesovedenie [Forestry]*, 3, 51–58. [in Russian].
24. Shorohova E., Kapitsa E. (2016) The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species. *European Journal of Forest Research*, 135, 593–606. DOI 10.1007/s10342-016-0957-8.
25. Krasnoshchekov Y. N., Vishnyakova Z. V., Perevoznikova V. D. et al. (2003) Ecological and Biological Features of Soils in Fir Forests Defoliated by the Siberian Moth in the Southern Taiga Subzone of Middle Siberia. *Izvestiya AN. Seriya biologicheskaya [Biology Bulletin]*, 5, 623–631. DOI 10.1023/A:1025811022200 [in Russian].
26. Zagreev V. V., Sukhikh V. I., Shvidenko A. Z., Gusev N. N., Moshkalev A. G. (1992) *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov [All-Union standards for forest inventory]*. Moscow: Kolos Publ., 495 p. [in Russian]

Об авторах

Ольга Александровна Слинкина – старший научный сотрудник научной лаборатории Защита леса.

Павел Владимирович Михайлов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник научной лаборатории Лесных экосистем.

Денис Александрович Демидко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории Защита леса.

Author details

Olga A. Slinkina – Senior Researcher, Scientific Laboratory of Forest Health.

Pavel V. Mikhailov – PhD, Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Laboratory of Forest Ecosystems.

Denis A. Demidko – PhD, Senior Researcher, Scientific Laboratory of Forest Health.

Получено / Received 10.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 16.01.2026

Принята к публикации / Accepted 04.02.2026

УДК 528.94:[316.42:004.451]

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-63-74>

Модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных на основе акторной сети с использованием технологии микросервисов

*С. А. Карин*¹✉

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: sergey.karin@gmail.com

Аннотация. В статье предложена модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных на основе акторной сети с использованием технологии микросервисов и сетей массового обслуживания. В основе предложенной модели лежит подход, в соответствии с которым обработка разнородных пространственных данных представляется в виде сетевого графа веб-сервисов, называемых акторами, при этом каждый актор является узлом обработки в сети массового обслуживания. В статье представлено обоснование выбранного подхода, а также с использованием разработанной модели предложен пример решения типовой задачи, связанной с обработкой разнородных пространственных данных. Основываясь на полученных результатах, делается вывод о том, что предложенная модель может служить основой для разработки систем интерактивного составления и выполнения целенаправленных рабочих процессов обработки разнородных данных с поддержкой обоснованного выбора задействованных акторов, мониторинга выполнения и валидации результатов, а также формулируются направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: обработка разнородных данных, микросервисная архитектура, сети массового обслуживания, пространственные данные, целенаправленные рабочие процессы

Для цитирования:

Карин С. А. Методы сбора и актуализации многомерных данных для целей создания геоинформационной системы доступности городской инфраструктуры. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 63–74. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-63-74>

A distributed actor network model for processing heterogeneous geospatial data using microservices

*S. A. Karin*¹✉

¹ Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

e-mail: sergey.karin@gmail.com

Abstract. This paper proposes a model for the distributed processing of heterogeneous geospatial data, leveraging actor networks, microservices, and queuing networks. The model conceptualizes

heterogeneous spatial data processing as a network graph of web services called actors, where each actor functions as a node in a queuing network. The approach is justified, accompanied by a practical example demonstrating the model's application to a representative heterogeneous spatial data processing task. The results indicate that the model provides a foundation for developing systems that enable interactive composition and execution of targeted workflows for heterogeneous data processing. These systems support reasoned actor selection, execution monitoring, and result validation, with outlined directions for future research.

Keywords: processing of heterogeneous data, microservices architecture, queuing networks, spatial data, purpose-driven workflows

For citation:

Karin S. A. (2026) A distributed actor network model for processing heterogeneous geospatial data using microservices. *Vestnik SSUGiТ [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 63–74. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-63-74>

Введение

Геопространственные данные об окружающей среде (в число которых входят данные дистанционного зондирования Земли и результаты их обработки, данные экологического и метеорологического мониторинга и т. п.) часто хранятся и публикуются в различных региональных, национальных и глобальных репозиториях [1-4] и используются для проведения различных научных исследований и экспериментов, а также решения аналитическими органами в системе государственного и муниципального управления расчетно-информационных задач, связанных с мониторингом и прогнозированием потенциально-опасных процессов природного или техногенного характера (Концепция построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город»: распоряжение Правительства Российской Федерации от 03.12.2014 № 2446-р. – URL: <https://static.mchs.gov.ru/uploads/document/19.09.2019/174757b288f39e0434ab86a0ce549bb7.pdf> – Текст : электронный).

В основе функционирования автоматизированных информационных систем, предназначенных для решения задач такого класса, лежит организация информационных потоков по сбору и обработке исходных данных для дальнейшего принятия решений по предотвращению или снижению ущерба на объектах мониторинга [5–10].

В качестве примера таких систем можно выделить программно-аппаратные комплексы «Безопасный город» [11–13], концепция построения и развития которых утвер-

ждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 03.12.2014 № 2446-р (ред. от 05.04.2019) (Концепция построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город»: распоряжение Правительства Российской Федерации от 03.12.2014 № 2446-р. – URL: <https://static.mchs.gov.ru/uploads/document/19.09.2019/174757b288f39e0434ab86a0ce549bb7.pdf> – Текст : электронный) и которые развернуты во многих регионах Российской Федерации, при этом спектр решаемых ими расчетно-информационных задач крайне широк – от простого контроля пороговых значений до сложного математического моделирования и системного анализа для принятия упреждающих мер. Примерами таких задач могут служить:

- прогнозирование погоды, наводнений, распространения лесных пожаров, лавинной опасности;
- оценка интенсивности и динамики развития ураганов, высоты выброса, направления и скорости распространения вулканического пепла;
- мониторинг целостности техногенных сооружений (мостов, плотин);
- прогнозирование развития аварий;
- оценка последствий и ущерба и т. п.

Сущность и особенности задач такого рода в процессе их декомпозиции на подзадачи требуют составления конвейеров (или цепочек) обработки исходных данных в некотором осмысленном порядке, при этом за расчеты, связанные с решением той или иной подзадачи, отвечает некоторый онлайн-сервис. В итоге, процедуры решения расчетно-

информационных задач можно рассматривать как некоторые целенаправленные рабочие процессы (ЦРП), которые в своем составе могут как иметь средства, позволяющие автоматизировать обработку, так и требовать ручного труда [14, 15].

Необходимо отметить, что решение многих типовых задач, примеры которых приведены выше, может быть осуществлено с использованием цепочек сервисов, каждый из которых по-разному реализует необходимые вычисления (например, более точное прогнозирование, но за более долгое время, требование более точных исходных данных и т. п.). Такие сервисы могут разрабатываться разными поставщиками и в будущем их число будет возрастать.

В этом смысле стоит задача не просто формирования конвейеров обработки данных в виде целенаправленных рабочих процессов, но и обоснованного выбора сервисов среди однотипных, осуществляющих те или иные расчеты.

В целом можно сказать, что аналитическая функциональность, позволяющая обрабатывать разнородные геопространственные данные большого объема в онлайн-режиме, имеет важное значение для моделирования окружающей среды. Поскольку доступны крупномасштабные распределенные репозитории геопространственных данных, повторное и совместное использование программного обеспечения, обрабатывающего эти данные, становится все более важным в интегрированном моделировании окружающей среды, научных экспериментах и анализе [13, 16, 17].

В настоящее время существует достаточное количество взаимодополняющих друг друга инструментов и интерфейсов, которые позволяют в той или иной мере реализовать распределенную обработку пространственных данных, в первую очередь это стандарты и спецификации OGC [18] и некоторые другие.

В частности, стандарт Web Processing Service (WPS) описывает способы публикации и обращения к отдельным сервисам обработки, однако не предоставляет инструментов для описания рабочих процессов (Open Geospatial Consortium : OGC WPS 2.0.2 Interface Standard. – URL: <https://docs.ogc.org/is/14-065/14-065r2.html>. – Текст : электронный).

Стандарт SpatioTemporal Asset Catalogs (STAC, пространственно-временной каталог активов) обеспечивает общую структуру для предоставления и каталогизации данных, таких как изображения, SAR, облака точек, кубы данных, Full Motion Video и т.д. от поставщиков данных (Radiant Earth Foundation : SpatioTemporal Asset Catalog (STAC). – URL: <https://stacspec.org/>. – Текст : электронный). STAC обеспечивает доступ к различным форматам пространственных данных и предоставляет общий способ поиска дополнительной информации о географическом местоположении за определенный период времени. В настоящее время ведется работа по включению данного стандарта в число стандартов OGC.

На основе Common Workflow Language (CWL), формального языка высокого уровня, можно описывать логику обработки данных в виде рабочих процессов [19]. Данный язык позволяет выполнять одни и те же рабочие процессы в различных средах, таких как локальные компьютеры, кластеры, облака и высокопроизводительные вычисления, однако не предоставляет механизмов выбора по различным критериям сервиса среди реализующих одинаковую логику (например, на наименее загруженном хосте или с наиболее высоким рейтингом и т. п.).

Таким образом, проблемная ситуация заключается в несовершенстве технологий, которые предоставляют исследователям и аналитикам возможность не просто объединять разнородные онлайн-данные и инструменты их обработки бесшовным образом, но и учитывать при этом различные критерии выбора соответствующих инструментов.

В данной статье представлена модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных, которая обеспечивает функционирование инструментов формирования целенаправленных рабочих процессов на основе поиска в репозиториях опубликованных данных и микросервисов, а также представления их в виде взаимосвязанных узлов сети массового обслуживания, предназначенной для автоматизации процессов научных исследований и решения различных расчетно-информационных задач в области мониторинга и прогнозирования потенциально опасных процессов природного и техногенного характера.

Подходы к реализации распределенной обработки разнородных геопространственных данных

Современные технологии, такие как сервис-ориентированная архитектура и микросервисы, позволяют кооперировать данные и компоненты целенаправленных рабочих процессов между различными организационными единицами и поддерживают повторное использование и взаимодействие компонентов в сложных автоматизированных системах, тем самым повышая эффективность их функционирования, а также снижая стоимость их разработки и последующей эксплуатации [20, 21].

В то время как традиционные рабочие процессы в бизнесе ориентированы на обработку документов и управление задачами, научные и аналитические рабочие процессы в области мониторинга и прогнозирования потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера обычно ориентированы на сбор, обработку и анализ больших объемов геопространственных данных [22–24] и часто включают их преобразование, анализ и моделирование в очередях [25].

В настоящее время оптимизация процессов моделирования окружающей среды осуществляется путем расширения стандартов в области геоинформационных технологий и функциональных возможностей геоинформационных систем в сторону поддержки удаленных вычислений и пространственных преобразований в компьютерных сетях. При этом в области организации процессов обработки разнородных геопространственных данных наиболее широкое распространение получили технологии, основанные на спецификациях консорциума открытых геосистем.

Эти технологии в первую очередь ориентированы на решение задач интеграции геопространственных данных и обмена ими, при этом сложной и слабо исследованной проблемой остается описание критериев обоснованного выбора сервисов обработки, а также организация общедоступных каталогов сформированных ЦРП и их развертывание в качестве цепочек сервисов обработки, которые могут быть применимы к другим приложениям.

Таким образом, для решения задачи по реализации инструментария формирования ЦРП обработки данных в области мониторинга и прогнозирования потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера предлагается подход, удовлетворяющий следующим условиям.

1. Поскольку требуется обеспечить единообразный доступ к огромному количеству крайне неоднородных инструментов обработки, реализующие их микросервисы и связанные с ними метаданные должны публиковаться посредством специализированных реестров, а сами микросервисы должны обнаруживаться с использованием описания метаданных их работы.

Описание и публикация геопространственных данных может быть реализована на основе применения стандартов OGC, таких как WFS, WMS, CSW, а также STAC и т. п. Описание и публикация доступных микросервисов обработки – на основе применения стандартов WPS, WCPS, а также специализированных решений для обработки данных, таких как облачные платформы и VI-системы, которые могут выполнять схожие функции, но в более широком контексте, а не только в геоинформатике.

2. Предлагаемая модель должна объединять опубликованные микросервисы в целенаправленные рабочие процессы для решения тех или иных научных или аналитических задач.

Описание целенаправленных рабочих процессов может быть реализовано с применением возможностей формальных языков CWL, Snakemake и т. п., при этом дополнительно должна поддерживаться возможность выбора по различным критериям среди сервисов, реализующих одинаковую логику.

3. Сформированные ранее описания ЦРП также должны храниться в репозиториях и быть доступны для повторного использования при решении похожих задач. В настоящее время не существует сервисов и стандартов, решающих эту задачу.

Далее будет рассмотрена модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных, которая позволяет реализовать предложенный подход.

Характеристика модели распределенной обработки разнородных геопространственных данных на основе технологии микросервисов

Для реализации предложенного выше подхода в данной статье рассмотрена модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных, схема которой представлена на рис. 1.

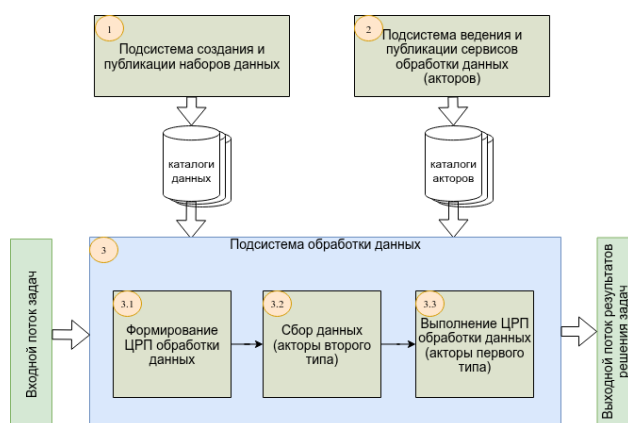


Рис. 1. Модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных на основе технологии микросервисов

Элементами модели распределенной обработки геопространственных данных являются автономные веб-сервисы (мы будем называть их акторами), что позволяет решать множество разнородных задач, включая задачи регистрации и обнаружения исходных данных, бесшовно сочетать высокоуровневую разработку целенаправленных рабочих процессов с выполнением и взаимодействием во время их выполнения, доступом к локальным и удаленным данным, а также локальным и удаленным вызовом служб вместе со встроенным механизмом управления параллелизмом и планирования заданий.

В состав предлагаемой модели входят следующие подсистемы:

- 1) подсистема создания и публикации наборов данных;
- 2) подсистема ведения и публикации сервисов обработки данных (акторов);
- 3) подсистема обработки данных.

Подсистема создания и публикации наборов данных может быть реализована на ос-

нове стандартов CSW, STAC и т. п. Сами наборы данных могут создаваться с использованием стандартов WFS, WMS, WTS и т. п. Результатом работы подсистемы является каталог данных, который содержит метаданные, необходимые для дальнейшего поиска требуемых наборов данных в подсистеме обработки.

Подсистема ведения и публикации сервисов обработки данных может быть реализована с применением стандартов WPS, WCPS, а также с применением иных специализированных решений. Результатом работы подсистемы является каталог акторов.

Актеры в рамках данной подсистемы делятся на два типа:

- 1) актеры первого типа, предназначенные для выполнения операций анализа и обработки данных;
- 2) актеры второго типа, предназначенные для запроса наборов исходных данных.

Геопространственные аналитические функции представлены как актеры первого типа, тогда как службы и сервисы, которые запрашивают исходные данные в различных форматах, являются актерами второго типа.

Актеры связаны друг с другом для составления целенаправленного рабочего процесса. При этом подсистема содержит несколько стандартных акторов, предназначенных для доступа к данным и сервисам их обработки, в частности, актер *WebService* предоставляет простой механизм подключаемого модуля для выполнения любой веб-службы. Используя этот компонент, любое приложение может быть развернуто как удаленная служба.

Подсистема обработки данных предполагает последовательное выполнение трех процессов:

- 1) формирование ЦРП обработки данных в рамках решения поступившей задачи;
- 2) сбор исходных данных, требуемых для решения поступившей задачи;
- 3) выполнение ЦРП обработки данных.

Формирование ЦРП обработки данных осуществляется путем декомпозиции поступившей задачи на подзадачи, дальнейшего их связывания с типами сервисов и может быть реализовано с использованием формальных языков *CWL*, *Snakemake* и т. п. со следую-

щими дополнениями при описании каждой подзадачи:

- описываются параметры доступа ко всем однотипным сервисам, пригодным для решения подзадачи;

- указываются критерии окончательного выбора сервиса обработки среди однотипных (они будут применяться в ходе выполнения ЦРП).

Далее ЦРП сохраняется в соответствующем каталоге с привязкой к типу задачи, для решения которой он сформирован. В дальнейшем, если для решения поступившей задачи в каталоге уже имеется подходящий ЦРП, то будет использован именно он без необходимости его повторного составления. После того, как ЦРП сформирован, начинаются процессы сбора исходных данных и выполнения ЦРП.

Подсистема обработки данных может быть представлена в виде частной модели, которая относится к классу многоканальных сетей массового обслуживания (СеМО) с приоритетами, при этом каждый узел такой сети представлен набором однотипных акторов.

Исходя из того, что для проведения некоторых вычислений в процессе решения поступившей задачи могут быть использованы разные акторы, которые в общем случае:

- реализуют разные алгоритмы;
- созданы разными разработчиками;
- адаптированы под разные наборы данных,

в метаданные каждого актора в подсистеме их ведения и публикации предлагается ввести дополнительный количественный параметр, который будет характеризовать приоритет выбора данного актора относительно других при проведении вычислений. Назовем такой параметр рейтингом. Присвоение значения данному параметру предполагается на основе усреднения экспертных оценок.

В контексте данной подсистемы акторы с присвоенным рейтингом будем называть ресурсами обработки. Каждый такой ресурс предназначен для проведения некоторого преобразования исходных данных (выполнения подзадачи) в единой системе вычислений в рамках сформированного целенаправленного рабочего процесса, разбитого на этапы [14, 15, 23].

Пусть рассматриваемая СеМО включает в свой состав N узлов. Имеющиеся ресурсы задаются матрицей $\Omega = \{\omega_{n,k}\}$, $n \in [1, N]$, n – тип ресурса (или узел СеМО), k – номер ресурса n -го типа. Доступность ресурсов в некоторый момент времени определяется матрицей Θ . В качестве элементов данной матрицы выступают значения 0 или 1, при этом число 0 означает, что данный ресурс недоступен, а 1 – что ресурс доступен. Для вычисления размерности этой матрицы определяется тип n , число σ_n ресурсов которого максимально. При этом количество столбцов матрицы определяется количеством ресурсов данного типа, а количество строк – количеством типов ресурсов (рис. 2). Если количество ресурсов заданного типа меньше, чем $\max(\sigma_n)$, то такой элемент имеет значение 0.

$$\Theta = \begin{matrix} & \xrightarrow{\max(\sigma_n)} & & & & & \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} & \left| \begin{matrix} \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \end{matrix} \right. & N \end{matrix}$$

Рис. 2. Порядок формирования матрицы доступности ресурсов

Каждый k -й ресурс в рамках n -го узла формально может быть представлен кортежем $\omega_{n,k} = \langle n, \xi_{n,k}, \tau_{n,k} \rangle$, при этом параметр $\xi_{n,k}$ определяет его рейтинг среди прочих однотипных ресурсов, входящих в узел, а $\tau_{n,k}$ определяет время, которое требуется ресурсу для выполнения подзадачи.

Элементы в строках матрицы Θ отсортированы по убыванию значения $\xi_{n,k}$, таким образом, в дальнейшем при выборе ресурса для окончательного составления ЦРП будем выбирать самый левый доступный ресурс, у которого значением в матрице Θ является 1. В дальнейшем предполагается расширить алгоритм выбора ресурса таким образом, чтобы использовать также и параметр $\tau_{n,k}$. В частности, можно будет предусмотреть требования по оперативности вычислений, предъявляемые к решаемой задаче в целом.

Важно отметить, что узлы сети могут обрабатывать свои подзадачи как параллельно, так и последовательно, при этом результаты работы одного элемента могут являться исходными данными для других элементов. Пример схемы, иллюстрирующей последовательность вычислений в рамках некоторого целенаправленного рабочего процесса, представлен на рис. 3.

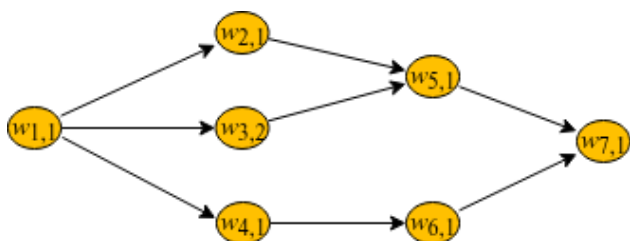


Рис. 3. Пример проведения вычислений в виде сетевого ориентированного графа в рамках целенаправленного рабочего процесса обработки данных

На рис. 3 для выполнения первой подзадачи в рамках ЦРП был выбран ресурс $w_{1,1}$, который выступил в качестве поставщика исходных данных для выполнения второй, третьей и четвертой подзадачи, которые выполняются параллельно ресурсами $w_{2,1}$, $w_{3,2}$ и $w_{4,1}$ соответственно. При этом $w_{2,1}$ и $w_{3,2}$ являются поставщиками исходных данных для выполнения пятой подзадачи, а $w_{4,1}$ – для шестой подзадачи, которые также выполняются параллельно. Результат выполнения задачи в целом в рамках ЦРП формирует ресурс $w_{7,1}$,

исходные данные для которого поставляют ресурсы $w_{5,1}$ и $w_{6,1}$. В каждый момент времени все ресурсы, для которых готовы исходные данные должны быть запущены в параллельном режиме.

Ход выполнения целенаправленного рабочего процесса можно отслеживать путем добавления в него дополнительных служебных ресурсов (акторов), которые будут осуществлять: обнаружение сбоев и восстановление работоспособности ЦРП, сбор промежуточных и конечных результатов процесса, определение происхождения данных, а также регистрацию информации о ходе процесса, сохранение журналов его выполнения и иные вспомогательные операции.

Пример обработки геопространственных данных сетью акторов

В качестве примера обработки геопространственных данных взята задача формирования несложного, но наглядного целенаправленного рабочего процесса для вычисления всех вхождений объектов вида А в пересечения выпуклых оболочек слоев объектов вида В и вида С. Цель данного примера заключается не в составлении рабочего алгоритма решения конкретной прикладной расчетно-аналитической задачи, а в демонстрации подхода к формированию ЦРП с использованием предложенной модели.

На рис. 4 представлена схема ЦРП для решения рассматриваемой задачи.

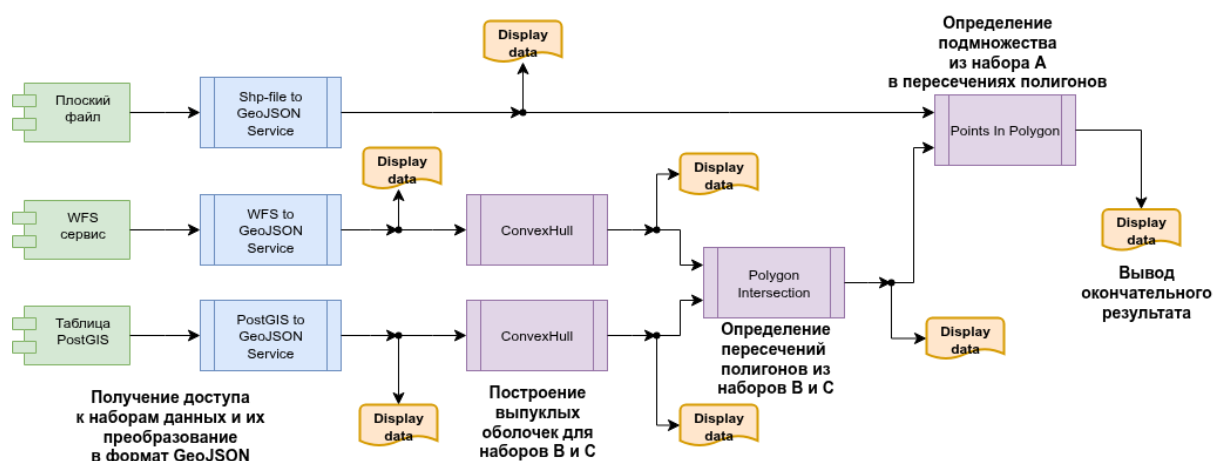


Рис. 4. Моделирование нахождения всех вхождений объектов вида А в пересечения выпуклых оболочек слоев объектов вида В и вида С

В ходе подготовки к решению задачи были подготовлены следующие наборы данных:

- 1) набор данных с объектами вида А представлен плоским shape-файлом;
- 2) набор данных с объектами вида В представлен WFS-сервисом;
- 3) набор данных с объектами вида С представлен таблицей в СУБД PostgreSQL с пространственным расширением PostGIS.

Кроме того, были настроены веб-службы для чтения наборов данных и проведения необходимых для решения задачи вычислений, при этом все веб-службы формируют результаты своих вычислений в формате GeoJSON (для векторных данных), который является наиболее современным и легковесным форматом для обмена геоданными между веб-ориентированными приложениями. Визуализация окончательных и промежуточных результатов решения рассматриваемой задачи может осуществляться средствами любой подходящей для этого геоинформационной системы, поддерживающей источники данных в формате GeoJSON или путем добавления в ЦРП новых акторов, обеспечивающих преобразование наборов данных из формата GeoJSON в любой поддерживаемый выбранной ГИС формат.

Основой последовательных вычислений в рамках рассматриваемого целенаправленного рабочего процесса являются следующие акторы:

- 1) Convex Hull – актор построения выпуклой оболочки;
- 2) Polygon Intersection – актор вычисления пересечения полигонов;
- 3) Points in Polygon – актор определения множества точек в полигоне.

Во время составления рабочего процесса осуществляется поиск нужных исходных данных и акторов:

- 1) акторов первого типа, которые отвечают за проведение вычислений;
- 2) акторов второго типа, которые обеспечивают доступ к исходным данным.

При наличии нескольких сервисов, реализующих заданные вычисления, будет выбран тот, который имеет наибольший рейтинг.

Выполнение сформированного ЦРП начинается с работы акторов второго типа, которые получают наборы исходных данных

и трансформируют их к единому формату для упрощения дальнейшей обработки. Поскольку для выполнения подзадач построения выпуклых оболочек для наборов данных В и С все готово, акторы «Convex Hull», их реализующие, могут быть запущены параллельно. При их завершении начинает выполняться актор «Polygon Intersection», реализующий вычисление пересечений выпуклых оболочек наборов данных В и С. Далее актор «Points in Polygon», который реализует определение множества точек в полигоне и который уже имеет исходный набор данных с объектами вида А, ожидает результатов выполнения актора «Polygon Intersection» и после их поступления формирует окончательный результат выполнения поступившей задачи.

Для визуального отображения в среде выбранной ГИС результирующих и промежуточных наборов данных на каждом шага обработки может быть использован актор «Display data». В контексте рассматриваемого примера данный актор обеспечивает визуализацию векторных данных, при этом для визуализации растровых данных он может быть заменен на иные, к примеру на основе формата GeoTIFF, на суть вычислительного процесса это не влияет.

При выполнении рассматриваемого ЦРП в его состав могут добавляться дополнительные акторы, реализующие различные функции мониторинга проводимых вычислений, например, контроль доступа к веб-службам, отсутствие сетевой связности, обработка исключений, журналирования результатов и т. п.

Таким образом может быть реализована расширяемая интерактивная система формирования и выполнения целенаправленных рабочих процессов с учетом обоснованного выбора акторов на основе их рейтинга среди однотипных в виде среды визуального программирования, которая может эффективно собирать, составлять, выполнять и контролировать распределенные геопространственные процессы для моделирования окружающей среды.

Заключение

В данной статье была представлена модель распределенной обработки разнородных геопространственных данных на основе техно-

логии микросервисов в виде целенаправленных рабочих процессов, представленных сетью акторов, для моделирования окружающей среды.

Отличительной особенностью данной модели является учет различных критериев выбора инструментов обработки данных, в частности, рейтинга акторов среди однотипных.

Предлагаемая модель может служить основой для разработки систем интерактивного составления и выполнения целенаправленных рабочих процессов обработки разнородных данных с поддержкой мониторинга выполнения и валидации результатов (для этого в структуру целенаправленных рабочих процессов могут встраиваться дополнительные специальные акторы). Публикация геопространственных данных и процессов в виде сервисов позволяет получить единую структуру для доступа к различным форматам и системам.

Что касается будущей работы, с точки зрения организации процессов обработки

геопространственной информации требуется дополнить систему критериев выбора соответствующего актора для включения в ЦРП, включающую не только его рейтинг, но и время, требуемое на выполнение вычислений. Кроме того, требуется разработать клиентское приложение для упрощения публикации наборов данных, включая решение проблем эффективности при обработке очень больших наборов данных. Также предполагается дальнейшее развитие модели в направлении оптимизации распределенного выполнения целенаправленных рабочих процессов в высоконагруженных системах и в системах, реализующих ролевою модель доступа к данным, которая позволяет пользователям создавать специальные группы, чтобы они могли совместно использовать свои данные и службы обработки через унифицированную инфраструктуру.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пространственные данные [электронный ресурс]. Университет МГИМО. URL: <https://mgimo.ru/about/structure/ucheb-nauch/imi/geo/docs/spatial-data/> (дата обращения: 25.10.2024).
2. Информационные ресурсы государственного кадастра недвижимости и территориального планирования в пространственном развитии государства : монография. колл. авторов; под ред. А. П. Сизова. М. : РУСАЙНС, 2021. – 86 с.
3. Карпик А. П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 4. С. 3–7.
4. Карпик А. П., Обиденко В. И. Исследование потребности федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации в пространственных данных. Новосибирск, 2021. 216 с.
5. Карпик А. П., Мусихин И. А., Ветошкин Д. Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 2. С. 155–163. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
6. Филиппов Д. В., Чурсин И. Н., Рулев Д. Д. Применение методов комплексной обработки данных дистанционного зондирования Земли для изучения процессов окисления почв с искусственным орошением. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 1. С. 80–91. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-80-91.
7. Зулин К. А., Кулик Е. Н. Использование данных дистанционного зондирования SENTINEL-2В для мониторинга последствий разливов нефти. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 2. С. 60–66. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-60-66.
8. Хлебникова Т. А., Арбузов А. С., Лисицкий Д. В., Оприпова О. А. Использование материалов БВС для выявления фактов нарушения земельного законодательства на территории г. Новосибирска. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 5. С. 33–40. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-33-40.
9. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24, № 3. С. 65–81. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81.

10. Гордиенко А. С., Ткач А. В. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам. Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 6. С. 55–63. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63.
11. Опыт реализации проекта АПК «Безопасный город» на территории Вологодской области [Электронный ресурс]. Компания «Актив». URL: https://www.aktivsb.ru/statii/opyt_realizatsii_proekta_apk_quotbezopasnyu_gorodquot_na_territorii_vologodskoy_oblasti.html (дата обращения: 30.09.2025).
12. О проблемных вопросах при построении АПК «Безопасный город» [Электронный ресурс]. Системы безопасности. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/o-problemnyh-voprosah-pri-postroenii-apk-bezopasnyj-gorod> (дата обращения: 30.09.2025).
13. Развитие «Безопасного города» требует интеграции коммуникационных и информационных технологий [Электронный ресурс]. МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/5289121> (дата обращения: 30.09.2025).
14. Алферов А. В., Карин А. И., Карин С. А., Октябрьский В. В. Метод адаптивного определения приоритетов информационно-расчетных задач в системах мониторинга потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера в условиях ресурсной ограниченности. Труды Военно-космической академии. 2021. Вып. 676. С. 95–104.
15. Карин А. И., Карин С. А., Октябрьский В. В. Модели адаптивного управления функционированием систем комплексной обработки геопространственных данных при решении задач мониторинга территориально-распределенных объектов. Труды Военно-космической академии. – 2019. – Вып. 671. – С. 314–325.
16. I. H. Sarker, M. M. Hoque, M. K. Uddin, and T. Alsanoosy, “Mobile data science and intelligent APPs: concepts, AI-based modeling and research directions,” *Mobile Networks and Applications*, Vol. 26, No. 1, P. 285–303, 2021.
17. D. Blazquez and J. Domenech, “Big data sources and methods for social and economic analyses,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 130, P. 99–113, 2018.
18. Standards [Электронный ресурс]. Open Geospatial Consortium. URL: <https://www.ogc.org/standards/> (дата обращения: 25.10.2024).
19. Common Workflow Language [Электронный ресурс]. Software Freedom Conservancy. URL: <https://www.commonwl.org/> (дата обращения: 25.10.2024).
20. Информационная модель – основа «умного города» [Электронный ресурс]. ISICAD. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19940 (дата обращения: 25.10.2024).
21. Вагизов М.Р., Заяц А.М. Концепция инфраструктуры единого геоинформационного центра управления лесным хозяйством (часть 1). Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 3. С. 50–61. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-50-61.
22. Wu J., Gan W., Chao H., and Yu P. S., “Geospatial Big Data: Survey and Challenges,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, P. 17007–17020, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2404.18428.
23. Akter S. and Wamba S. F., “Big data and disaster management: a systematic review and agenda for future research,” *Annals of Operations Research*, vol. 283, P. 939–959, 2019.
24. Lacroix P., Moser F., Benvenuti A., Piller T., Jensen D., Petersen I., Planque M., and Ray N., “MapX: An open geospatial platform to manage, analyze and visualize data on natural resources and the environment,” *SoftwareX*, vol. 9, P. 77–84, 2019.
25. Карин С. А., Карин А. И. Способ повышения эффективности комплексной обработки данных дистанционного зондирования Земли при решении задач мониторинга пространственных объектов. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 691–698. DOI 10.17586/2226-1494-2022-22-4-691-698.

REFERENCES

1. MGIMO University. Spatial data (n. d.). Retrived from: <https://mgimo.ru/about/structure/ucheb-nauch/imi/geo/docs/spatial-data/> (date of the application: 24.10.2024) [In Russian].

2. Sizov, A. P. (Ed.). (2021) *Informacionnye resursy gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti i territorial'nogo planirovanija v prostranstvennom razvitii gosudarstva: monografija* [Information resources of the state real estate cadastre and territorial planning in the spatial development of the state]. Moscow: RUSAJNS [In Russian].
3. Karpik, A. P. (2014). Analysis of the state and problems of geoinformation support of territories. *Izv. vuzov. Geodezija i ajerofotos'emka* [News of universities. Geodesy and aerial photography], 4, 3–7 [In Russian].
4. Karpik, A. P., Obidenko, V. I. (2021). *Issledovanie potrebnosti federal'nyh organov ispolnitel'noj vlasti Rossijskoj Federacii v prostranstvennyh dannyh* [Study of the needs of federal executive bodies of the Russian Federation for spatial data]. Novosibirsk, 216 p. [In Russian]
5. Karpik, A. P., Musikhin, I. A., Vetoshkin, D. N. (2021). Smart information models as an effective tool of regional spatial and economic development. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 26(2), 155–163. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163 [in Russian].
6. Filippov, D. V., Chursin, I. N., Rulev, D. D., Boyarenkova, A. D. (2023). Implementation of complex methods of earth's remote sensing data processing for studying carbonation processes of soils with artificial irrigation. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 28(1), 80–91. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-80-91 [in Russian].
7. Zulin, K. A., Kulik, E. N. (2023). Oil spill monitoring using SENTINEL-2B remote sensing data. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 28(2), 60–66. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-60-66 [in Russian].
8. Khlebnikova, T. A., Arbuzov, S. A., Lisitsky, D. V., Opritova, O. A. (2023). The use of UAS materials to identify facts of land legislation violation in the territory of Novosibirsk. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 28(5), 33–40. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-33-40 [in Russian].
9. Dolgopолоv, D. V., Nikonov, D. V., Poluianova, A. V., Melkii, V. A. (2019). Possibilities of visual interpretation of main pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 24(3), 65–81. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81 [in Russian].
10. Gordienko, A. S., Tkach, A. V. (2022). Study of the state of the environment in the area of oil production using space images. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 27(6), 55–63. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63 [in Russian].
11. Aktiv Company. Experience in implementing the “Safe City” APCS project in the Vologda region (n. d.). Retrived from: https://www.aktivsb.ru/statii/opyt_realizatsii_proekta_apk_quotbezopasnyy_gorodquot_na_territorii_vologodskoy_oblasti.html (date of the application: 30.09.2025) [In Russian].
12. Security systems. On the problematic issues in the construction of the "Safe City" automated control system (n. d.). Retrived from: <https://www.secuteck.ru/articles/o-problemnyh-voprosah-pri-postroenii-apk-bezopasnyj-gorod> (date of the application: 30.09.2025) [In Russian].
13. Ministry of Emergency Situations of Russia. The development of a "Safe City" requires the integration of communication and information technologies (n. d.). Retrived from: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/5289121> (date of the application: 30.09.2025) [In Russian].
14. Alferov, A. V., Karin, A. I., Karin, S. A., Oktyabrsky, V. V. (2021). Method of adaptive determination of priorities of information and calculation tasks in systems for monitoring potentially hazardous processes of natural and man-made nature in conditions of resource limitations. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii* [Proceedings of the Military Space Academy], 676, 95–104 [In Russian].
15. Karin, A. I., Karin, S. A., Oktyabrsky V. V. (2019). Models of adaptive control of functioning of systems for integrated processing of geospatial data in solving problems of monitoring territorially distributed objects. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii* [Proceedings of the Military Space Academy], 671, 314–325 [In Russian].
16. I. H. Sarker, M. M. Hoque, M. K. Uddin, and T. Alsanoosy, “Mobile data science and intelligent APPs: concepts, AI-based modeling and research directions,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 26, no. 1, pp. 285–303, 2021.

17. D. Blazquez and J. Domenech, "Big data sources and methods for social and economic analyses," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 130, pp. 99–113, 2018.
18. Open Geospatial Consortium. Standards (n. d.). Retrived from: <https://www.ogc.org/standards/> (date of the application: 25.10.2024).
19. Software Freedom Conservancy. Common Workflow Language (n. d.). Retrived from: <https://www.commonwl.org/> (date of the application: 25.10.2024).
20. ISICAD. An information model is the basis of a smart city (n. d.). Retrived from: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19940 (date of the application: 24.10.2024) [In Russian].
21. Vagizov, M. R., Zayats, A. M. (2022). The concept of the infrastructure of a single geoinformation center for forestry management (part 1). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(3), 50–61. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-50-61 [In Russian].
22. J. Wu, W. Gan, H. Chao, and P. S. Yu, "Geospatial Big Data: Survey and Challenges," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 17007-17020, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2404.18428.
23. S. Akter and S. F. Wamba, "Big data and disaster management: a systematic review and agenda for future research," *Annals of Operations Research*, vol. 283, pp. 939–959, 2019.
24. P. Lacroix, F. Moser, A. Benvenuti, T. Piller, D. Jensen, I. Petersen, M. Planque, and N. Ray, "MapX: An open geospatial platform to manage, analyze and visualize data on natural resources and the environment," *SoftwareX*, vol. 9, pp. 77–84, 2019.
25. Karin, S. A., Karin, A. I. (2022) Method for increasing the efficiency of integrated processing of Earth remote sensing data in solving problems of monitoring spatial objects. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics]*, 22(4), 691–698. DOI 10.17586/2226-1494-2022-22-4-691-698 [In Russian].

Об авторе

Сергей Александрович Карин – кандидат военных наук, доцент, кафедра оптико-электронных средств.

Author details

Sergey A. Karin – PhD, Associate Professor, Department of Optical-Electronic Equipment.

Получено / Received 26.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.09.2025

Принята к публикации / Accepted 16.10.2025

УДК 528.9:004.8

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-75-87>

Методологические аспекты использования искусственного интеллекта в картографии

А. А. Колесников¹, Д. В. Лисицкий¹, Я. Г. Пошивайло^{1✉}, С. С. Янкелевич¹

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

e-mail: yaroslava@ssga.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в картографии. Авторы обосновывают необходимость перехода к полной автоматизации картографических процессов в условиях лавинообразного роста объема пространственных данных и повышения требований к скорости их обработки, вплоть до режима реального времени. Особую значимость этим исследованиям в России придают национальные проекты по созданию многоспутниковой орбитальной группировки и Национальной системы пространственных данных (НСПД). На основе анализа зарубежных и отечественных публикаций рассматриваются эволюция и современное состояние темы – от ранних экспертных систем до современной парадигмы Геопространственного ИИ (GeoAI). Выделены ключевые преимущества, тенденции, модели, приложения и этические вызовы, связанные с интеграцией ИИ в картографию. В статье сформулированы основные проблемы, сдерживающие развитие направления в России, включая недостаточную разработанность теоретико-методологической и семантической основы, отсутствие структурированной базы профессиональных знаний и отставание в создании конкурентоспособных отечественных ГИС-платформ. В качестве решения обозначенных проблем предложены методологические, технологические и организационные меры. Ключевые предложения включают: создание российского Свода профессиональных картографических знаний и Единой национальной базы картографических знаний; поэтапную разработку инструментов картографии на основе ИИ (от интеллектуального помощника до виртуального геоаналитика); проведение научных исследований для формализации процессов и адаптации технологий ИИ к картографии. В заключении определены перспективные направления дальнейших исследований и разработок, необходимых для обеспечения лидерства России в области высокотехнологичного картографирования и геопространственного ситуационного территориального мониторинга.

Ключевые слова: картография, искусственный интеллект, геопространственный искусственный интеллект, профессиональные картографические знания, геопространственный ситуационный мониторинг

Для цитирования:

Колесников А. А., Лисицкий Д. В., Пошивайло Я. Г., Янкелевич С. С. Методологические аспекты использования искусственного интеллекта в картографии. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 75–87. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-75-87>

Methodological dimensions of artificial intelligence applications in cartography

A. A. Kolesnikov¹, D. V. Lisitsky¹, Y. G. Poshivaylo^{1✉}, S. S. Yankelevich¹

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

e-mail: yaroslava@ssga.ru

Abstract. The paper addresses the pressing issue of applying artificial intelligence (AI) technologies in cartography. The authors substantiate the need for full automation of cartographic processes amid the

avalanche-like growth in spatial data volumes and increasing demands for data processing up to real-time. Related studies hold particular significance in Russia due to national projects aimed at establishing a multi-satellite orbital constellation and the National Spatial Data System. Drawing on an analysis of overseas and domestic publications, the paper examines the evolution and current state of the discussed issues starting from early expert systems to the modern paradigm of Geospatial AI. It highlights key advantages, trends, models, applications, and ethical challenges associated with AI integration in cartography. The authors identify core problems impeding progress in Russia, including underdeveloped theoretical, methodological and semantic foundations, the absence of a structured professional knowledge base, and lags in developing competitive domestic GIS platforms. To address these challenges, methodological, technological, and organizational measures are proposed in the paper. Key recommendations include establishing National Cartographic Knowledge Codex and Unified Cartographic Knowledge Base as well as phased development of AI-based cartography tools (from intelligent assistants to virtual geoanalysts) and conducting research aimed at formalization of processes and introduction of AI-based technologies in cartography. In conclusion, the paper delineates prospective directions for future research and development, which are imperative for establishing Russia's preeminence in advanced cartographic technologies and geospatial situational monitoring.

Keywords: cartography, artificial intelligence, GeoAI, professional cartographic knowledge, geospatial situational monitoring

For citation:

Kolesnikov A. A., Lisitsky D. V., Poshivaylo Y. G., Yankelevich S. S. (2026). Methodological dimensions of artificial intelligence applications in cartography. *Vestnik SSUGiТ [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 75–87. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-75-87>

Введение в тему

Искусственный интеллект, наряду с Интернетом вещей и квантовыми вычислениями, представляет собой одно из наиболее впечатляющих достижений 4-й индустриальной революции, обеспечивающее стремительное развитие практически всех видов человеческой деятельности, особенно интеллектуальной. В полной мере это относится и к картографии, в которой преобладающая часть производственных процессов сегодня основана на непосредственном использовании интеллекта картографа, а скорость составления карт и атласов ограничивается преимущественно человеческим фактором. Особую актуальность вопрос применения ИИ получил в последние годы, когда в сферах, использующих картографическую продукцию, в полной мере проявились две ключевые тенденции – неуклонный рост потока пространственных данных о территориях и существенное повышение требований потребителей к сокращению сроков создания карт и планов, вплоть до режима реального времени. Единственным вариантом удовлетворения этих требований является полная автоматизация картографических процессов на основе ИИ.

Особую актуальность исследованиям и разработкам по рассматриваемой тематике, выполняемым в России, придают два взаимосвязанных детерминанта национального уровня:

1. Принята и реализуется Государственная программа Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» с завершением в 2030 г. (Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных»: Постановление Правительства РФ от 01.12.2021 № 2148 (ред. от 11.02.2025) – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный).

2. По поручению президента России В. В. Путина реализуется национальный проект «Развитие многоспутниковой орбитальной группировки», имеющий целью кратное увеличение численности действующей российской орбитальной группировки спутников к 2030 г. [1].

Реализация этих проектов означает, что уже с 2030 г. в России будет введена в эксплуатацию система сбора и создания огромного потока пространственных данных, отображающих состояние территории Российской Федерации и зарубежных территорий, происходящих на них процессов, явлений и событий,

в том числе по некоторым из них практически в режиме реального времени, например при возникновении чрезвычайных ситуаций различного характера. При этом будет достигнут синергетический эффект за счет того, что значительное увеличение группировки космических аппаратов кратно увеличит объемы данных дистанционного зондирования, а результаты их обработки обеспечат поддержание в актуальном состоянии Единой электронной картографической основы (ЕЭКО) России, проведение ситуационного территориального мониторинга, повышение уровня обеспеченности потребностей экономики, безопасности и граждан в пространственных данных.

Указанные реалии потребуют значительного увеличения степени автоматизации формирования геоинформационных моделей и карт, что может быть обеспечено только за счет активного внедрения технологий ИИ.

Материалы и методы исследований

Рассмотрение проблем, задач, вопросов, методологических аспектов и формулирование предложений по реализации методов и технологий ИИ в картографии основывается на анализе отечественных и зарубежных публикаций и на результатах собственных комплексных исследований по цифровой картографии, выполняемых на кафедре картографии и геоинформатики Сибирского государственного университета геосистем и технологий [2].

Как было нами установлено, проблемы, задачи и вопросы по тематике использования ИИ в картографии начали формулироваться в мировой и отечественной литературе еще в конце прошлого века в контексте создания экспертных систем. За рубежом одной из первых публикаций в мире на эту тему была статья D. J. Reuquet [3], в которой рассмотрены структуры пространственных данных для представления знаний на основе географической информационной системы (ГИС). В нашей стране одними из первых были статья В. С. Тикунова [4], а затем монография А. В. Кошкарева и В. С. Тикунова [5], в которой выделен раздел, посвященный созданию баз знаний и экспертных систем.

В последующие годы эта тематика последовательно разрабатывалась, особенно в США, по линии консорциума NCGIA (National Center for

Geographic Information and Analysis) в направлении формализации картографических знаний. Например, в отчете [6] было предложено формализовать следующие знания:

- декларативные (геометрические и негеометрические факты);
- процедурные (алгоритмы и методы);
- структурные (географическое значение, включая процессы генерации данных);
- семантические (значение в контексте);
- эпизодические (временные коннотации).

В материалах Международной картографической ассоциации (International Cartographic Association, ICA) рассматриваются вопросы природы знаний, их создания и формализации, предполагается, что у картографии есть особые потребности, связанные с ее дисциплинарными границами, ролью неопределенных и «проблемных» знаний в ее предмете. Выполнена [7] оценка модели структуры, содержания и использования сводов знаний (BoK) по другим дисциплинам, а также приведены результаты проделанной работе по созданию картографической базы данных и использованию метода экспертной оценки Delphi для ее разработки. В публикации [8] отмечается, что использование систем, основанных на знаниях, стало возможным благодаря разработкам в области ИИ и что существует необходимость внедрения картографических правил непосредственно в программы для составления карт, особенно в программное обеспечение ГИС. Высказывается мнение, что реального картографа можно частично заменить использованием системы знаний (intelligent system).

В последнее десятилетие активно проводятся исследования по использованию ИИ в картографии в рамках комплексных разработок по геопро пространственной разведке GEOINT (geospatial intelligence). В связи с этим, в США резко растет число компаний-единорогов (частных стартапов, с рыночной оценкой более 1 млрд долларов), представляющих следующее поколение технологий, работающих на основе ИИ и геопро пространственной разведки, что позиционирует США как мирового лидера в области геопро пространственных инноваций. В отчете о состоянии и будущем GEOINT высказывается мнение о том, что это направление находится в центре расходящейся конвергенции между методами науки

о данных, прогнозирования и предиктивной аналитики, а также такими технологиями, как ГИС, дистанционное зондирование Земли, искусственный интеллект, высокопроизводительные вычисления, а также развивающихся технических средств, таких как малые спутники, дроны, датчики типа «in situ» и интеллектуальные устройства [9]. В Геологической службе США (USGS) имеются значительные достижения по использованию Геопространственного искусственного интеллекта (GeoAI) в топографическом картографировании, создании цифровых геопространственных баз данных, проектировании интеллектуальной национальной карты. Отмечается, что компоненты интеллектуальной национальной карты включают в себя: извлечение и сопоставление признаков, обобщение, многомасштабное представление, разработку семантических данных, обработку логических выводов и графические пользовательские интерфейсы с возможностью запросов и визуализации результатов прямых запросов, а также подключение к обширному массиву данных и информации во Всемирной паутине. Сделан вывод, что Геологической службе США необходимо адаптировать GeoAI для создания интеллектуальной национальной карты, а GeoAI, как новая парадигма обработки геопространственных данных, формирует новое направление в геоинформатике и ГИС [10].

В работе о будущем картографии в связи с использованием ИИ [11] эта инновация провозглашается как «новая эра картографии», «революция в картографии», связанная с возможностью непрерывного мониторинга, выявления закономерностей и прогнозирования динамики окружающей среды. Среди ключевых тенденций, которые изменят способы создания, использования и понимания карт, указываются: повышение уровня автоматизации, развитие дополненной реальности (AR) в картографических приложениях, интеграция данных в картографические системы в реальном времени, переход к персонализированным картам, автоматическое обновление карт, расширение возможностей взаимодействия пользователей с картографическими технологиями. Отмечается появление таких понятий, вошедших в последние годы в пользовательскую среду, как «умная» карта, ин-

теллектуальные картографические технологии, сторителлинг в картографической визуализации, тепловые карты. В качестве наиболее острых проблем, обусловленных внедрением в картографию ИИ, указываются конфиденциальность данных, алгоритмическая предвзятость (обусловленная возможным использованием в машинном обучении ошибочных, недостоверных данных), общественное понимание и доверие пользователей, которым будет все сложнее понимать, как создаются эти карты и какие данные при этом используются. Сформулированы основополагающие принципы применения ИИ:

- прозрачность в вопросах получения и использования данных;
- регулярная проверка алгоритмов ИИ для выявления и устранения предвзятости;
- вовлечение сообщества в процесс составления карты для обеспечения учета различных точек зрения (краудсорсинг);
- соблюдение правил конфиденциальности и безопасности данных для обеспечения сохранности личной информации и индивидуальных предпочтений пользователей.

Сделан вывод, что «интеллектуальные картографические технологии – это не просто тренд, а фундаментальное изменение в том, как мы понимаем наш мир и ориентируемся в нем... эти технологии делают карты более интерактивными, информативными и отвечающими нашим потребностям» [11].

В фундаментальном исследовании методов, приложений и этики использования ИИ в картографии [12] отмечается, что новый исследовательский импульс, названный Геопространственным искусственным интеллектом (GeoAI), был вызван развитием глубокого обучения и подходов машинного обучения в информатике. Для картографии это обусловило два преимущества:

- технологии GeoAI могут достигать лучших результатов в решении нескольких сложных картографических задач по сравнению с классическими статистическими и вычислительными подходами;
- технологии GeoAI могут помочь достичь такого уровня автоматизации картографических и геоинформационных процессов, которого существующие инструменты ГИС не позволяют.

Выполненные исследования охватывают вопросы источников и форматов данных для картографии, оценки карт, пространственно-временного моделирования, дизайна и этики применения ИИ в картографии.

Рассмотрены три типа источников данных: авторитетные наборы данных (поддерживаются и публикуются правительствами), коммерческие наборы данных (предоставляются крупными технологическими компаниями, такими как Google Maps и Bing Maps) и наборы данных, созданные легитимными пользователями.

Детально раскрыты шесть категорий моделей GeoAI, каждая из которых служит для различных картографических задач: деревья решений (DT), технологии графов знаний и семантической сети (KG & SWT), глубокие сверточные нейронные сети (D CNNs), генеративные состязательные сети (GANs), графовые нейронные сети (GCNs) и обучение с подкреплением (RL).

Проанализированы семь приложений картографического дизайна, которые на сегодняшний день используют GeoAI: обобщение, символизация, типографика, чтение карт, интерпретация карт, анализ карт и производство карт.

Раскрыты такие этические проблемы, которые требуют внимания при интеграции GeoAI и картографии, как коммерциализация, ответственность, конфиденциальность, предвзятость и (вместе) прозрачность, объяснимость и происхождение.

Предложены четыре потенциальных темы для будущих исследований в области картографии с использованием GeoAI: активная картографическая символизация; человек в процессе интеллектуализации картографии; картографирование на основе GeoAI как услуга и генеративный искусственный интеллект для картографии.

Следует отметить, что исследование выполнено по 101 англоязычной публикации в наиболее авторитетных мировых изданиях. Из русскоязычных публикаций упомянута только одна – статья Я. Г. Пошивайло и А. А. Колесникова [13], посвященная вопросам организации высшего образования для геопространственной индустрии.

Действующий президент Международной картографической ассоциации (ICA) Georg Gartner на период 2023–2027 гг. отмечает, что ICA не только поддерживает, но и активно содействует развитию роли картографии в ИИ [14]. Картография выступает в качестве важнейшего инструмента для GeoAI и больших языковых моделей, поскольку она предоставляет пользователям возможность визуализировать сложные данные, извлекать из них значимую информацию и эффективно сообщать о своих выводах. Он утверждает, что картография является фундаментальной частью будущего геопространственного интеллекта и аналитики на основе ИИ. Интегрируя картографические принципы, модели на основе GeoAI можно использовать для создания тематических карт, которые обеспечивают лицам, принимающим решения, понимание сложных геопространственных данных, облегчая планирование на основе данных и распределение ресурсов. Такая синергия между картографией и ИИ имеет решающее значение, поскольку она позволяет проводить более глубокий анализ и принимать эффективные решения за счет расширения возможностей людей по интерпретации, визуализации и прогнозированию геопространственных закономерностей.

В России публикаций по рассматриваемой тематике существенно меньше, при этом основные исследования по применению ИИ вначале осуществлялись в рамках общих задач геоинформатики, затем в контексте разработок интеллектуальных геоинформационных систем, а в последние годы – в направлении технической реализации существующих алгоритмов для решения частных задач. При этом крайне мало работ теоретического характера, раскрывающих новые методологические и концептуальные подходы развития геоиндустрии в целом и картографирования в частности.

В статье В. П. Савиных и В. Я. Цветкова [15] рассматриваются особенности решения ряда задач в геоинформатике, которые сближены с методами ИИ и направлены на извлечение, получение и формирование геоинформационных знаний об окружающем мире.

А. А. Гловатов анализирует технологические барьеры развития геоинформационных технологий как предпосылки интеллектуали-

зации ГИС [16], под которой подразумевает использование методов ИИ на каком-либо одном либо на всех этапах полной функции анализа данных. Автор делает вывод о том, что построение интеллектуальных ГИС остро ставит задачу их методологического обеспечения. По его мнению, в качестве методологической основы интеллектуализации геоинформационных систем, кроме собственно ИИ, следует рассматривать такие научные направления, как общая теория геосистем и геоинформационное моделирование.

Эта же тема получает развитие в статье [17], где ГИС рассматривается как объект исследования и интеллектуализации. Констатируется, что в интеллектуальных ГИС применимы классическая обработка информации и интеллектуальная обработка больших данных в сочетании, например, искусственной нейронной сети и ГИС. На современном этапе интеллектуализация включает поиск вариантов решений задачи, выбор оптимального, решения и наличие четкой или нечеткой постановки задачи. Такой подход характерен постановкой сложных задач, решение которых осуществимо множеством алгоритмов. При этом, методы интеллектуализации различаются, что обусловлено различием главных функций ГИС и вследствие этого многообразием специализации ГИС и, соответственно, ИИ. Получает развитие интеллектуализация ГИС на основе применения мультиагентных алгоритмов, которые применяют при нечеткой постановке задачи. Делается вывод, что несмотря на долгий путь развития проблема интеллектуализации ГИС далека от своего завершения, особенно в области теории и обобщения. Она требует дальнейших исследований, особенно для решения задач в условиях фактической или условной неопределенности.

В уже упомянутой монографии [2] также исследуются вопросы подготовки методологической основы и решается ряд частных задач с применением ИИ в картографии.

Так, С. С. Янкелевич в разделе 1.6. «Когнитивная картография» рассмотрены основные предпосылки формирования новой концепции картографии, сущность которой заключается в развитии классического картографического метода исследования в направлении использо-

вания, наряду с геоинформацией, накопленных геопространственных знаний в виде алгоритмов, программ и моделей в составе интеллектуальных ГИС. Это обеспечивает формализацию знаний, создание баз знаний и применение технологических решения по использованию ИИ в картографии. Более подробно результаты выполненных исследований приведены в диссертационном исследовании автора данного раздела [18].

В разделе 2.4. «Искусственный интеллект и машинное обучение в цифровой картографии» А. А. Колесниковым выделены такие уникальные особенности картографии, как вариативность исходных данных, разнообразие представления значений координат, большое количество алгоритмов обработки всех видов данных; интерпретируемость результатов и построенной математической модели для многомерных данных. Проанализированы основные технические и программные средства ИИ и машинного обучения в картографии. Приведены типовые примеры решаемых задач, такие как геопозиционирование фотографий и видеороликов, не имеющих информации о параметрах и координатах съемки; определение и уточнение типов данных в атрибутивных таблицах; обработка облаков точек; сегментация спутниковых и аэроснимков; обработка неструктурированных текстов; автоматическое картографирование по данным с беспилотных авиационных систем (БАС); интеграция данных из внешних источников; стилизация картографических изображений; геостатистика и пространственно-временное прогнозирование; пространственно-временное моделирование и визуализация динамических процессов в окружающей среде. В привязке к указанным задачам раскрыты наиболее часто используемые в цифровой картографии алгоритмы и методы. Сделан вывод о том, что достижения в области ИИ могут реализовать новые идеи, выходящие за рамки существующей теории, обеспечить решение тех задач, которые ранее решались только человеком, способствовать дальнейшему пониманию самой теории картографии.

В разделе 2.1. «Геоинформационное картографирование и геоинформационный анализ» Я. Г. Пошивайло выполнена формализа-

ция геоинформационного картографирования с учетом технологических режимов выполнения геопространственных функций в аспекте уровня автоматизации процессов. Перечислены направления революционных изменений картографии, в том числе развитие технологии картографической визуализации в виде виртуальной и дополненной реальностей и существенное повышение уровня автоматизации процессов составления и обновления карт за счет применения ИИ, машинного обучения и геокогнитивных технологий. Сделан вывод о том, что ГИС будут ориентированы на создание 3D и 4D геоинформационных цифровых двойников, а затем с их использованием на реализацию пространственного мониторинга и выработку управляющих пространственных решений.

Еще одно диссертационное исследование в области картографии в направлении создания научно-теоретической основы и разработки автоматизированных методов генерализации пространственных данных, обеспечивающих воспроизведение географических особенностей картографируемых объектов, представленных в исходных цифровых моделях, выполнено Т. Е. Самсоновым в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова [19]. Был разработан и доведен до уровня технической (в том числе программной) реализации целый ряд из 18 оригинальных методик генерализации, в основе каждой из которых предложен новый или адаптирован известный частно-специализированный метод решения задачи. Совокупность полученных результатов исследований может быть положена в основу создания профессиональной картографической базы знаний в части генерализации карт, что, безусловно, обеспечит дальнейшую реализацию методов и технологий ИИ в картографии.

Результаты исследований

В целом, анализ зарубежных и отечественных публикаций по вопросу использования ИИ в картографии позволяет сделать три важных обобщения:

– использование методов и технологий ИИ в картографии, безусловно, позволит ре-

шить назревшую проблему существенного, на порядок, повышения скорости картографирования территорий при одновременном кратном увеличении объемов исходных геопространственных данных;

– теоретические и методологические основы картографии требуют соответственного развития и дополнения, отражающего революционные технологические изменения;

– приоритетное развитие в ближайшие годы получит оперативное картографирование как часть территориального мониторинга, обеспечивающего ситуационную осведомленность органов власти и управления территориями разного уровня, производственными процессами в экономике, при кризисных ситуациях и в военном деле в режиме практически реального времени.

Следует иметь в виду, что необходимо создание инструментов интеграции традиционных подходов и инновационных технологий. Традиционные методы составления карт основаны на опыте специалистов-картографов, знающих особенности территории и учитывающих национально-культурные аспекты восприятия пространства. Технологии ИИ предлагают автоматизацию процессов создания карт, однако зачастую приводят к утрате индивидуальности картографического продукта и снижению внимания к специфическим особенностям конкретных регионов.

Вследствие этого появляется ряд вопросов по постановке, содержанию и направлениям исследований по указанной тематике.

1. Какие основные проблемы, противоречия и препятствия сдерживают применение ИИ в картографии?

2. Какова стратегия последовательной реализации методов и технологий, разработок программного обеспечения для применения ИИ в картографии?

3. Как должен быть организован процесс создания Свода профессиональных знаний по картографии, а затем формирования и ведения Единой национальной базы профессиональных картографических знаний на основе ИИ в России?

4. Какие принципиальные изменения должны произойти в геоинформационных системах и сервисах, для того, чтобы обеспе-

читать интеллектуализацию создания картографической продукции?

5. Какими должны быть план и механизмы внедрения разработок по ИИ в картографическое производство?

Наряду с общими проблемами использования ИИ в жизнедеятельности человека (этические и психологические аспекты, конфиденциальность и безопасность, справедливость и прозрачность алгоритмов, нормативно-правовое регулирование и др.), имеются и специфические проблемы картографии, в том числе в связи с национальными реалиями:

- возможности методов и технологий ИИ используются в мировой картографии весьма ограниченно вследствие недостаточной подготовленности для этого ее теоретической и методологической основы;

- в Российской Федерации отсутствует необходимая семантическая основа для реализации ИИ в области картографии, содержащая профессиональные знания в формализованном виде;

- на всех этапах создания и использования картографических произведений и геоинформационных моделей возникают сложности подбора подходящих для конкретной картографической задачи технических решений и программных средств ИИ, совокупность которых применительно к картографии недостаточно структурирована и при этом непрерывно увеличивается;

- имеются сложности и ограничения для открытого доступа большого числа источников геоинформации;

- имеются проблемы, связанные с созданием конкурентноспособных отечественных технологических платформ и ГИС;

- отстает в развитии нормативно-правовая база в сфере геопространственных данных, знаний, интеллектуальной продукции и геопространственного искусственного интеллекта.

Исходя из имеющегося зарубежного и отечественного опыта применения ИИ в картографии на настоящем этапе развития геоиндустрии можно предложить следующие методологические, технологические и организационные идеи по решению проблем и ответов на поставленные вопросы.

1. В порядке развития научно-методических основ картографии необходима кооперация ведущих университетов страны в данной области

по разработке российского «Свода профессиональных знаний по картографии» в соответствии с отечественной научной школой.

2. Модернизацию отечественной картографии в аспекте использования ИИ целесообразно проводить в рамках государственно-частного партнерства, в котором формирование и ведение «Единой национальной базы профессиональных картографических знаний» обеспечивает государство (в части полномочий Росреестра), а разработка технологий и программных приложений ведется на коммерческой основе различными организациями.

3. С целью обеспечения технической реализации ИИ необходимы специальные научные исследования технологий геоинформационного картографирования по формализации технологических процессов и созданию баз профессиональных знаний.

4. Технологические инструменты на основе геопространственного ИИ целесообразно разрабатывать поэтапно, с постепенным повышением уровня использования:

- а) информационный помощник картографа по вопросам картографии – ИПК (интеллектуальный справочник);

- б) интеллектуальный консультант картографа – ИКК (для выработки профессиональных картографических решений);

- в) виртуальный картограф – ВК (для выполнения производственных процессов картографии);

- г) виртуальный геоаналитик – ВГА (для выработки пространственных отраслевых решений).

5. Необходимы исследования и разработки семантической (содержательной) основы для функционирования ИИ в соответствии с уровнем его использования:

- а) базы формализованных профессиональных знаний картографа (БФПЗК) – созданной на основе явных знаний, содержащихся в виде определений, правил, принципов, критериев, шаблонов процессов, каталога геооператоров и специально созданных сводов профессиональных знаний по аналогии с зарубежной GIS&T Body of Knowledge [20] и др.;

- б) базы неформализованных знаний по картографии (БНФПЗК) – совокупности отобранных текстовых и картографических ис-

точников, их библиографических описаний, адресов в Интернете, содержащих пояснения и предложения по развитию, толкованию, уточнению, дополнению, обновлению явных профессиональных знаний и неявные знания авторов этих материалов (ГОСТы, справочники, инструкции, наставления, карты, атласы, монографии, учебники, научные отчеты, статьи и др.);

в) системы отбора контента из Интернета (КИ) всех источников по картографии, включающих неформализованные знания о картографируемых территориях – текстовые, картографические, фото- и видеоисточники, содержа-

ние которых пропускается через специальные фильтры, отсекающие недостаточно авторитетные, адекватные и достоверные материалы;

г) системы отбора контента из различных отраслевых материалов (КОМ), содержащего неформализованные отраслевые знания о геопространственном факторе отраслевой деятельности в текстовом виде (отраслевые ГОСТы, справочники, инструкции, наставления, карты, монографии, учебники, научные отчеты, статьи и др.).

Взаимосвязи рассмотренных компонентов сферы использования ИИ в картографии показаны в таблице.

Сфера использования ИИ в картографии

Искусственный интеллект в картографии	Уровни использования искусственного интеллекта			
	Предоставление по запросу явных профессиональных знаний в формализованном виде	Выработка по запросу профессиональных решений по картографическим процессам и продукции	Управление выполнением производственных картографических процессов	Выполнение пространственного анализа и выработка пространственных решений (по отраслям)
Инструмент на основе геопространственного интеллекта	Информационный помощник картографа (ИПК)	Интеллектуальный консультант картографа –ИКК (в том числе включает функции ИПК)	Виртуальный картограф – ВК (в том числе функции ИКК)	Виртуальный геоаналитик – ВГА (в том числе часть функций ВК)
Получаемый результат	Справка по запросу	Технологические решения	Составительские оригиналы	Оценка ситуации и пространственные решения
Содержательная основа для реализации ИИ	БФПЗК	БФПЗК, БНФПЗК	БФПЗК, БНФПЗК, КИ	КОМ, БФПЗК, БНФПЗК, КИ
Необходимые мероприятия по подготовке к реализации средств искусственного интеллекта в картографии на основе профессиональных знаний и экспертных материалов	Выявление и формализация явных профессиональных картографических знаний. Формирование и актуализация БФПЗК	Поиск, анализ и отбор источников неявных картографических знаний. Выработка критериев отбора источников, формирование и актуализация БНФЗК	Системный анализ и алгоритмизация профессиональных картографических знаний о картографических процессах. Разработка методов и технологий экспертного машинного обучения ИИ	Выявление и накопление отраслевых знаний пользователей о геопространственном факторе отраслевой деятельности. Алгоритмизация процессов пространственного анализа
Реализация методов и средств искусственного интеллекта в картографии на основе профессиональных знаний и экспертных материалов	Разработка программных решений и средств описания картографических процессов и продуктов по запросам пользователей	Разработка программных решений и средств представления картографическим процессам и продуктам с использованием искусственного интеллекта	Разработка программных решений и средств по выполнению картографических процессов с использованием искусственного интеллекта. Машинное обучение ИИ	Разработка программных решений и средств по выполнению пространственного анализа с использованием искусственного интеллекта. Машинное обучение ИИ

Выводы и дальнейшие перспективы исследования

Имеющийся в мире и России опыт применения ИИ в картографии показывает его боль-

шие возможности и перспективы в достижении ранее недостижимой цели – полной автоматизации картографических процессов, в том числе и в режиме практически реального времени. Особое значение данное достиже-

ние приобретает в критически важных сферах деятельности, характеризующихся необходимостью оперативной реакции на изменения обстановки: мониторинг антропогенных и природных изменений территории, эффективное управление земельными и иными природными ресурсами, прогнозирование и минимизация последствий кризисных ситуаций природного и техногенного характера. Получение актуальных цифровых картографических продуктов в минимальные временные интервалы способствует повышению качества управленческих действий и снижению рисков при принятии решений.

В нашей стране имеются факторы и предпосылки существенного развития исследований и разработок по данной тематике, есть определенные достижения и результаты. В то же время имеются проблемы, сдерживающие этот процесс и требующие решения задач научного и организационного плана.

В первую очередь необходимо:

– расширить круг научных исследований по развитию научно-методологических основ картографии, формированию нового образа мышления, новой концепции для обеспечения эффективного применения ИИ;

– выполнить специальное научное исследование в области геоинформационного картографирования по формализации технологических процессов и созданию баз знаний, в том числе на основе методов онтологий и семантических сетей;

– выполнить специальное научное исследование по адаптации базовых технологий ИИ к особенностям и специфике геопространственных задач и интеллектуальной продукции;

– выполнить специальное научное исследование по созданию отечественной интел-

лектуальной ГИС и геопространственных цифровых двойников;

– организовать профессиональное картографическое сообщество России на создание семантической основы для реализации ИИ в виде «Свода профессиональных знаний по картографии», «Единой национальной базы профессиональных картографических знаний», системы отбора контента из Интернета и других внешних источников, содержащего неформализованные знания о картографируемых территориях и о геопространственном факторе в различных отраслях деятельности;

– развернуть комплексные исследования по созданию на базе ИИ национальной высокотехнологичной платформы для осуществления геопространственного ситуационного мониторинга (в англоязычной литературе – геопространственная разведка), обеспечивающей ситуационную осведомленность о территории, оценку и эффективное управление ресурсами, логистикой, производственными объектами и процессами вплоть до режима реального времени;

– инициировать обсуждение на государственном уровне необходимости дополнения перечня функций ППК «Роскадастр» новой функцией по осуществлению ситуационного территориального мониторинга в интересах органов государственной власти, местного самоуправления, юридических лиц и граждан, а также в целях обеспечения обороноспособности и безопасности государства;

– проводить планомерную модернизацию учебных программ с учетом развития новых технологий, в том числе ИИ, дополненной реальности, компьютерного зрения и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нацпроекты.РФ. [Электронный ресурс]. URL: <https://нацпроекты.рф./naczproekt-razvitiemnogospuznikovoj-orbitalnoj-gruppirovki/>.
2. Андрухина Ю. Н., Бугаков П. Ю., Касьянова Е. Л., Кацко С. Ю., Колесников А. А., Комиссарова Е. В., Лисицкий Д. В., Молокина Т. С., Радченко Л. К., Пошивайло Я. Г., Утробина Е. С., Янкелевич С. С. Цифровая картография : монография; под научной редакцией Д. В. Лисицкого. Новосибирск : СГУГиТ, 2023. 442 с. ISBN 978-5-907711-37-2.
3. Peuquet D. J. Data Structures for a Knowledge-Based Geographic Information System. Proceedind of International Geographical Union International Symposium on Spatial Data Handling. Zurich, Switzerland, 1984. P. 372–391.

4. Тикунов В. С. Исследования по искусственному интеллекту и экспертные системы в географии. Вестник Московского университета, сер. геогр. 1989, № 6. С. 3–9.
5. Кошкарёв А. В., Тикунов В. С. Геоинформатика / Под ред. Д. В. Лисицкого. М. : Картгеоцентр. «Геодезиздат», 1993. 213 с.
6. Buttenfield B. NCGIA Research Initiative 8 (Formalizing Cartographic Knowledge): Scientific Report for the Specialist Meeting (95-15) - eScholarship. 1995 [Электронный ресурс]. URL: https://www.academia.edu/129018897/NCGIA_Research_Initiative_8_Formalizing_Cartographic_Knowledge_Scientific_Report_for_the_Specialist_Meeting_95_15_eScholarship.
7. Fairbairn D. Creating a Body of Knowledge for cartography. Proceedings of the ICA. – 2018 [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/325185021_Creating_a_Body_of_Knowledge_for_cartography. – DOI:10.5194/ICA-PROC-1-35-2018
8. Dobešová Z., Brus J. Intelligent Systems in Cartography. Ed.: V. M. Koleshko. Intelligent Systems, InTech, Rieka, Croatia. 2012. P. 257–276 ISBN 978-953-51-0054-6.
9. 2020-SaFoG_2020 State and Future of GEOINT Report [Электронный ресурс]. URL: <https://usgif.org/wp-content/uploads/2024/06/2020-SaFoG.pdf>
10. Usery E. L., Arundel S. T., Shavers E., Stanislawski L., Thiem P., Varanka D. GeoAI in the US Geological Survey for topographic mapping. Transactions in GIS. 2022. Vol. 26, P. 25–40. DOI: 10.1111/tgis.12830.
11. Navigating the Future: AI and Cartography [Электронный ресурс]. URL: <https://aifutureday.com/details-7492000-navigating-the-future-ai-and-cartography.html>.
12. Yuhao K., Song G.a, Robert E. R. Artificial Intelligence Studies in Cartography: A Review and Synthesis of Methods, Applications, and Ethics. Cartography and Geographic Information Scienc. 2024. Vol. 51(2), P. 1–32. DOI: 10.1080/15230406.2023.2295943.
13. Пошивайло Я. Г., Колесников А. А. Разработка образовательной концепции для геопространственной отрасли в рамках основных технологий цифровой экономики. InterCarto/ InterGIS-27 : сборник материалов Международной конференции (21–23 августа 2021 г.). М.: Т. 27, № 1, С. 29–43. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-29-43.
14. Why AI and Large Language Models Benefit from Cartography [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esri.com/about/newsroom/arcnews/why-ai-and-large-language-models-benefit-from-cartography>.
15. Савиных В. П., Цветков В. Я. Развитие методов искусственного интеллекта в геоинформатике. Транспорт Российской Федерации, 2010. № 5. С. 41–43.
16. Глотов А. А. Интеллектуализация геоинформационных систем: подходы и направления. Геоматика. 2015. № 4. С. 119–123.
17. Бучкин В. А. Состояние и развитие интеллектуальных ГИС. Информация и космос. 2020. № 3. С.119–123.
18. Янкелевич С. С. Разработка теории и методологии картографирования территорий на основе геопространственных знаний : автореф. дис. док техн. наук. М.: МИИГАиК, 2024. 48 с.
19. Самсонов Т. Е. Генерализация пространственных данных и ее картографические приложения: автореф. дис. док географ. наук. М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2025. 50 с.
20. GIS&T Body of Knowledge. The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (BoK) is available via two new platforms to support more extensive data exploration, search, discovery, and visualization [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ucgis.org/site/gis-t-body-of-knowledge>.

REFERENCES

1. Natsproyekty.RF. URL: <https://нацпроекты.рф./naczproekt-razvitie-mnogosputnikovoj-orbitalnoj-gruppirovki>.
2. Andryukhina, Ju. N., Bugakov, P. Ju., Kasyanova, E. L., Katsko, S. Ju., Kolesnikov, A. A., Komissarova, E. V., Lisitsky, D. V., Molokina, T. S., Radchenko, L. K., Poshivaylo, Ya. G.,

- Utrobina, E. S., Yankelevich, S. S. (2023). *Cifrovaja kartografija [Digital cartography]:* D. V. Lisitsky (Eds.). Novosibirsk: SGUGiT, 442 p. (In Russian). ISBN 978-5-907711-37-2.
3. Peuquet, D. J. (1984) Data Structures for a Knowledge-Based Geographic Information System. *Proceedings of International Geographical Union International Symposium on Spatial Data Handling*. Zurich, Switzerland, pp. 372–391.
 4. Tikunov, V. S. (1989). Research on artificial intelligence and expert systems in geography. *Vestnik moskovskogo universiteta, seriya geografiya [Vestnik of Moscow University, geography series]*, 6, pp. 3–9. [In Russian].
 5. Koshkarev, A. V., Tikunov V. S. (1993) *Geoinformatika [Geoinformatics]* / D.V. Lisitsky (Eds.). Moscow: Kartgeocenter - "Geodezizdat". 213 p. [In Russian].
 6. Buttenfield, B. (1995) NCGIA Research Initiative 8 (Formalizing Cartographic Knowledge): Scientific Report for the Specialist Meeting (95-15) – eScholarship. Retrieved from https://www.academia.edu/129018897/NCGIA_Research_Initiative_8_Formalizing_Cartographic_Knowledge_Scientific_Report_for_the_Specialist_Meeting_95_15_eScholarship.
 7. Fairbairn, D. (2018) Creating a Body of Knowledge for cartography. *Proceedings of the ICA*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/325185021_Creating_a_Body_of_Knowledge_for_cartography. DOI:10.5194/ICA-PROC-1-35-2018
 8. Dobešová, Z., Brus, J. (2012) Intelligent Systems in Cartography. Ed.: V. M. Koleshko. *Intelligent Systems, InTech, Rieka, Croatia*, pp. 257–276 ISBN 978-953-51-0054-6.
 9. 2020-SaFoG_2020 State and Future of GEOINT Report Retrieved from <https://usgif.org/wp-content/uploads/2024/06/2020-SaFoG.pdf> (2022).
 10. Usery, E. L., Arundel, S. T., Shavers, E., Stanislawski, L., Thiem, P., Varanka, D. GeoAI in the US Geological Survey for topographic mapping. *Transactions in GIS*. Vol. 26, pp. 25–40. DOI: 10.1111/tgis.12830.
 11. Navigating the Future: AI and Cartography Retrieved from <https://aifutureday.com/details-7492000-navigating-the-future-ai-and-cartography.html>.
 12. Yuhao, K., Song, G.a, Robert, E. R. (2024) Artificial Intelligence Studies in Cartography: A Review and Synthesis of Methods, Applications, and Ethics. *Cartography and Geographic Information Scienc.* Vol. 51(2), pp. 1–32. DOI:10.1080/15230406.2023.2295943.
 13. Poshivaylo, Ya. G. Kolesnikov, A. A. (2021, August 21–23). Development of an educational concept for the geospatial industry within the framework of the main technologies of the digital economy. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoj konferencii [Proceedings of the International Conference InterCarto/InterGIS-27]*. Moscow: Vol.27(1), pp. 29–43. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-29-43. [In Russian].
 14. Why AI and Large Language Models Benefit from Cartography Retrieved from <https://www.esri.com/about/newsroom/arcnews/why-ai-and-large-language-models-benefit-from-cartography>.
 15. Savinykh, V. P. Tsvetkov, V.Ya. (2010) Development of artificial intelligence methods in geoinformatics. *Transport v Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 5. pp. 41–43. [In Russian].
 16. Glotov, A. A. (2015). Intellectualization of geographic information systems: approaches and directions. *Geomatika [Geomatics]*, 4, pp. 119–123 [In Russian].
 17. Buchkin V. A. (2020). Status and development of intelligent GIS. *Informacija i kosmos [Information and Space]*, 3, pp.119–123. [In Russian].
 18. Yankelevich S. S. (2024) *Razrabotka teorii i metodologii kartografirovaniya territoriy na osnove geoprostran-stvennykh znaniy [Development of theory and methodology for mapping territories based on geospatial knowledge]:* Extended Abstract of D.Sc. Thesis. Moscow: MIIGAiK, 48 p. [In Russian].

19. Samsonov T. E. (2025) *Generalizatsiya prostranstvennykh dannykh i yeye kartograficheskiye prilozheniya [Spatial data generalization and its cartographic applications]*: Extended Abstract of D.Sc. Thesis. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 50 p. [In Russian].

20. GIS&T Body of Knowledge. The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (BoK) is available via two new platforms to support more extensive data exploration, search, discovery, and visualization Retrieved from <https://www.ucgis.org/site/gis-t-body-of-knowledge>.

Об авторах

Алексей Александрович Колесников – кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики.

Дмитрий Витальевич Лисицкий – доктор технических наук, профессор, директор НИИ стратегического развития.

Ярослава Георгиевна Пошивайло – кандидат технических наук, заведующая кафедрой картографии и геоинформатики.

Светлана Сергеевна Янкевич – доктор технических наук, профессор, ректор университета.

Author details

Alexey A. Kolesnikov – PhD, Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics.

Dmitry V. Lisitsky – D. Sc., Professor, Director of Scientific Research Institute of Strategic Development.

Yaroslava G. Poshivaylo – PhD, Head of the Department of Cartography and Geoinformatics.

Svetlana S. Yankelevich – D. Sc., Professor, Rector.

Получено / Received 05.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 03.03.2026

Принята к публикации / Accepted 12.03.2026

УДК 528.94(470.61)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-88-97>

Оценка изменений земельного покрова в бассейне Нижнего Дона

В. В. Кулыгин¹, А. В. Парфенова¹✉

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

e-mail: annparfenowa@mail.ru

Аннотация. Земельный покров отражает физические характеристики земной поверхности, а землепользование – способы обработки земли с точки зрения функциональной роли земель в экономике. Материалы спутниковой съемки широко применяются для создания наборов данных о типе земельного покрова. Целью работы является оценка изменений в распределении земель бассейна Нижнего Дона с использованием данных European Space Agency Climate Change Initiative Global Land Cover (ESA CCI). Период исследования: 1992–2022 гг. Сравнение данных ESA CCI со статистическими данными о земельном фонде Ростовской области показало, что среднеквадратичная ошибка определения структуры земельного фонда не превышает 10 %. В работе даны количественные оценки изменений площадей, занимаемых разными классами земельного покрова. Рассмотрена временная динамика трансформации структуры земель. По результатам анализа было выделено два отрезка времени, когда происходили наиболее сильные изменения земельного покрова в бассейне Нижнего Дона: это рубеж XX и XXI вв. и период 2018–2022 гг.

Ключевые слова: земельный покров, изменения землепользования, Нижний Дон

Для цитирования:

Кулыгин В. В., Парфенова А. В. Оценка изменений земельного покрова в бассейне Нижнего Дона. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 88–97. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-88-97>

Assessment of land cover changes in the Lower Don river basin

V. V. Kulygin¹, A. V. Parfenova¹✉

¹Federal Research Centre the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russian Federation

e-mail: annparfenowa@mail.ru

Abstract. Land cover describes the physical characteristics of the Earth's surface, while land use pertains to management practices defined by land's functional economic roles. Satellite imagery is extensively employed to produce land cover datasets. The study assesses spatiotemporal changes in land cover distribution across the Lower Don River Basin, using European Space Agency Climate Change Initiative Global Land Cover (ESA CCI) data for 1992-2022. Validation against Rostov region statistical land fund records yielded a root mean square error (RMSE) for land structure estimation of $\leq 10\%$. Quantitative assessments detail area shifts among land cover classes, alongside an analysis of temporal transformation dynamics. Key findings highlight two periods of significant change in land cover: the late 20th – early 21st century transition and 2018-2022.

Keywords: land cover, land use change, Lower Don river basin

For citation:

Kulygin V. V., Parfenova A. V. (2026). Assessment of land cover changes in the Lower Don river basin. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 88–97. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-88-97>

Введение

Одними из основных данных при модельном изучении потоков вещества, поступающих с водосбора в речную сеть, является информация о состоянии земельного покрова водосбора и землепользовании, ведущемся на нем. Изменение типа земной поверхности и/или характера ее обработки также является важной информацией с точки зрения анализа эффективности экономической деятельности. Так, одна из серьезных проблем современного землепользования – вовлечение в экономику страны неиспользуемых земель, в частности, для нужд сельского хозяйства [1].

Современная пространственная информация о земельном покрове формируется на основе данных дистанционного зондирования Земли. Сравнительно высокое пространственное и временное разрешение последних позволяет давать количественную оценку трансформации ландшафтов [2]; выполнять мониторинг структуры землепользования и земельного покрова [3]. Одним из наиболее продолжительных наборов данных о земельном покрове является European Space Agency Climate Change Initiative Global Land Cover (ESA CCI) [4], содержащий данные с 1992 г.

С 2007 г. в нижнем течении реки Дон наблюдается низкий сток [5], что напрямую влияет на многие процессы в Азовском море. При этом на водосборе Нижнего Дона продолжает активно развиваться сельскохозяйственный комплекс. Для исследования изменений величины и химического состава донских вод, поступающих в Азовское море, в том числе требуется информация о структуре

земельного покрова и характере землепользования на водосборе реки. Актуальность темы исследования также связана с необходимостью поиска причин снижения качества воды в районе Ростовской агломерации для обеспечения надлежащих условий водоснабжения.

Целью работы является анализ изменений в земельном покрове бассейна Нижнего Дона по данным ESA CCI. Характеристики земельного покрова впоследствии предполагается использовать в моделях оценки вещества, поступающего с водосбора.

Методы и материалы

В ходе исследования рассматривались данные о земельном покрове ESA CCI [4], полученные на основе спутниковых снимков. При классификации использовались спутниковые снимки AVHRR HRPT (1992–1999 гг.), SPOT-Vegetation (1998–2013 гг.), MERIS (2003–2012 гг.), PROBA-V (2014–2019 гг.), Sentinel-3 OLCI и SLSTR (2020–2022 гг.).

Данные о земельном покрове представлены сеточными областями, составленными для каждого года за период 1992–2022 гг. Их пространственное разрешение составляет 300 м. Легенда насчитывает 37 классов, из которых в пределах бассейна Нижнего Дона встречается 20 классов (рис. 1).

По результатам проверки качества классификации снимков в ESA CCI доля правильно классифицированных объектов от общего числа объектов составила 71–72 % [6, 7]. Основные ошибки связаны с различием земель с неорошаемым и орошаемым земледелием, а также с определением разных классов древесного покрова.



Рис. 1. Земельный покров в границах бассейна Нижнего Дона по данным ESA CCI по состоянию на 2022 г. Красной линией выделены границы Ростовской области

Из исходных сеточных областей извлекалась часть, ограниченная полигоном бассейна Нижнего Дона. Для исследования произошедших изменений в распределении классов земельного покрова за каждый год подсчитывалось количество пикселей каждого класса и рассматривалось их изменение во времени 1992–2022 гг. Для упрощения визуализации и интерпретации исходная легенда была генерализована до 7 классов (процесс создания генерализованной легенды представлен в [8]).

Для оценки качества глобального набора данных о земельном покрове использовалась информация о структуре земельного фонда Ростовской области. Территория Ростовской области почти полностью находится в пределах бассейна Нижнего Дона, а ее доля в общей площади водосбора составляет 39 % (см. рис. 1).

Данные о динамике структуры земельного фонда Ростовской области подготовлены на основе материалов [9–22] и государственного (национального) доклада о состоянии и использовании земель в Российской Федерации за 2023 г. [23]. Рассматривалась информация о распределении земельного фонда по категориям земель и по угодьям.

Для каждого года различие между распределением земель Ростовской области по данным докладов и по данным глобального набора данных в пределах Ростовской области считалось как среднеквадратичная

ошибка (RMSE) между векторами долей классов единой легенды:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^d - y_i)^2},$$

где y_i^d – доля i -го класса в распределении земель Ростовской области по данным об использовании земель, %; y_i – доля i -го класса в распределении земель Ростовской области по данным ESA CCI, %; $n = 7$ – число классов.

Для каждого класса также считалась абсолютная разница между долями классов, определяемых по данным докладов и по ESA CCI.

Для определения изменений в структуре земельного покрова бассейна Нижнего Дона по данным ESA CCI выполнялось попиксельное сравнение сеточных областей для всех пар соседних лет за период 1992–2022 гг. Для каждой пары последовательных лет выделялись все пиксели, у которых изменился класс с i -го на j -й. Результаты представлялись в виде временных диаграмм, отображающих величину и структуру земель, перешедших в конкретный класс или выбывших из него, для каждого года.

Результаты и обсуждение

Растительный покров бассейна Нижнего Дона отражает черты лесостепи на севере,

степной зоны на большей части бассейна и сухостепной зоны на юге бассейна. Наибольшие площади в бассейне Нижнего Дона занимают классы «пашня», «травянистая растительность» и «древесная растительность» (табл. 1). Всего на долю пахотных земель приходится около 79 %, прочей травянистой растительности – 9,4 %, древесной рас-

тительности – 6,7 %. Водные объекты занимают 2,3 %, застроенные территории – 2 %.

В наборе данных ESA CCI не выделяются объекты малого пространственного размера (дороги, водная поверхность, деревья) в пределах населенных пунктов. Вследствие этого наблюдается ошибочное возникновение класса «пашня» в черте поселений.

Таблица 1. Динамика структуры земельного покрова в бассейне Нижнего Дона за 1992–2022 гг. по данным ESA CCI в %

Год	Пашня	Травянистая растительность	Древесная растительность	Водные поверхности	Водно-болотная растительность	Застроенные территории	Земли, лишенные растительности
1992	76,91	11,27	5,23	2,29	0,31	0,90	3,09
1993	76,90	11,27	5,23	2,29	0,31	0,92	3,09
1994	76,88	11,27	5,22	2,29	0,31	0,94	3,09
1995	76,97	11,25	5,22	2,30	0,31	0,96	3,00
1996	77,06	11,22	5,25	2,30	0,31	0,97	2,89
1997	77,29	11,16	5,29	2,30	0,31	0,99	2,65
1998	77,28	11,14	5,33	2,31	0,31	1,01	2,61
1999	77,24	11,08	5,67	2,35	0,31	1,03	2,31
2000	79,03	10,62	6,10	2,35	0,31	1,05	0,54
2001	78,94	10,60	6,10	2,35	0,31	1,23	0,47
2002	78,81	10,59	6,09	2,34	0,31	1,42	0,43
2003	78,61	10,60	6,08	2,34	0,31	1,63	0,43
2004	78,42	10,58	6,10	2,34	0,31	1,87	0,38
2005	78,42	10,59	6,09	2,34	0,31	1,87	0,37
2006	78,44	10,60	6,08	2,34	0,31	1,87	0,35
2007	78,49	10,63	6,07	2,33	0,31	1,88	0,27
2008	78,50	10,64	6,06	2,33	0,32	1,91	0,24
2009	78,50	10,67	6,05	2,32	0,32	1,92	0,21
2010	78,53	10,68	6,04	2,33	0,32	1,92	0,19
2011	78,52	10,70	6,03	2,32	0,32	1,93	0,18
2012	78,53	10,69	6,03	2,32	0,32	1,94	0,16
2013	78,50	10,72	6,02	2,31	0,32	1,95	0,16
2014	78,50	10,71	6,03	2,31	0,33	1,96	0,16
2015	78,50	10,71	6,03	2,31	0,33	1,96	0,16
2016	78,46	10,72	6,07	2,31	0,33	1,97	0,16
2017	78,48	10,67	6,09	2,31	0,32	1,97	0,15
2018	78,59	10,43	6,22	2,31	0,32	1,98	0,15
2019	78,90	9,87	6,47	2,30	0,32	1,99	0,14
2020	79,01	9,54	6,70	2,30	0,32	1,99	0,14
2021	79,04	9,43	6,74	2,30	0,33	2,02	0,14
2022	79,05	9,37	6,74	2,30	0,33	2,07	0,14
Среднее	78,24	10,65	5,95	2,32	0,32	1,61	0,92

Согласно данным об использовании земель Ростовской области общая тенденция за период 2008–2022 гг. заключается в росте

доли пашни и земель под застройкой и сокращении земель под пастбища. Сравнение с данными ESA CCI дает среднюю за 2008–

2022 г. среднеквадратичную ошибку (RSME), равную 9,36 % (табл. 2). За весь период она изменится незначительно: до 2018 г. падает, после немного растет. Причины такого изменения могут быть связаны с использованием разного набора спутниковых снимков за разные годы.

Основной источник неточности связан с определением классов «пашня» и «травянистая растительность». Здесь абсолютная разница между данными об использовании земель Ростовской области и данными ESA CCI составляет около 20 % для класса «пашня» и около 14 % для класса «травянистая растительность». Как было отмечено при сравнении разных глобальных наборов данных [8], ESA CCI, имеющий сравнительно низкое

пространственное разрешение, дает более высокие значения доли пашни в основном за счет класса «травянистая растительность», так как сумма этих двух классов для всех наборов данных составляет около 90 % территории водосбора Нижнего Дона. Доля остальных классов в земельном фонде Ростовской области по ESA CCI определяется с достаточно высокой точностью (табл. 2).

В целом можно признать качество набора данных ESA CCI как удовлетворительное: среднеквадратичная ошибка определения структуры земельного фонда Ростовской области не превышает 10 %; разница в определении конкретных классов не превышает 3 %, за исключением классов «пашня» и «травянистая растительность».

Таблица 2. Сравнение структуры земельного фонда Ростовской области по данным об использовании земель и по данным ESA CCI

Год	Абсолютная разница, %							RSME, %
	Пашня	Травянистая растительность	Древесная растительность	Водные поверхности	Водно-болотная растительность	Застроенные территории	Земли, лишенные растительности	
2008	20,70	14,09	0,45	1,33	0,18	2,63	2,03	9,56
2009	20,52	13,93	0,44	1,33	0,17	2,62	2,04	9,47
2010	20,45	13,86	0,44	1,33	0,17	2,61	2,05	9,44
2011	20,47	13,85	0,46	1,34	0,17	2,60	2,04	9,44
2012	20,43	13,82	0,47	1,34	0,17	2,59	2,05	9,42
2013	20,30	13,68	0,48	1,35	0,17	2,58	2,05	9,35
2014	20,31	13,67	0,47	1,35	0,17	2,59	2,05	9,35
2015	20,30	13,66	0,47	1,35	0,17	2,59	2,06	9,35
2016	20,23	13,62	0,44	1,35	0,17	2,59	2,06	9,32
2017	20,08	13,48	0,42	1,36	0,17	2,59	2,06	9,24
2018	19,79	13,31	0,29	1,36	0,17	2,59	2,07	9,12
2019	20,07	13,85	0,02	1,36	0,17	2,60	2,07	9,32
2020	20,13	14,13	0,21	1,36	0,17	2,60	2,07	9,39
2021	19,91	14,03	0,27	1,36	0,17	2,55	2,07	9,30
2022	19,91	14,09	0,29	1,36	0,17	2,50	2,07	9,32
Среднее	20,24	13,80	0,37	1,35	0,17	2,59	2,06	9,36

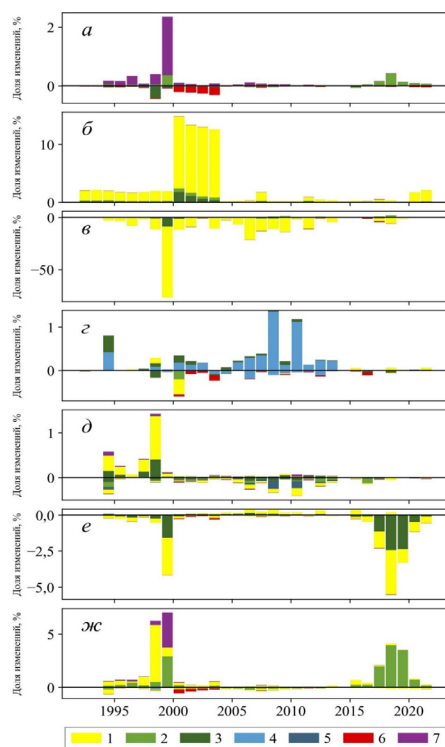


Рис. 2. Структура изменения площади классов земельного покрова в бассейне Нижнего Дона за период 1992–2022 гг. в %: а) пашня; б) застроенные территории; в) земли, лишённые растительности; г) водно-болотная растительность; д) водные поверхности; е) травянистая растительность; ж) древесная растительность. Легенда: 1 – пашня; 2 – травянистая растительность; 3 – древесная растительность; 4 – водные поверхности; 5 – водно-болотная растительность; 6 – застроенные территории; 7 – земли, лишённые растительности

Рассмотрим тенденции в изменении земельного покрова бассейна Нижнего Дона за период 1992–2022 гг. Диаграммы на рис. 2 показывают величину и структуру изменившейся площади каждого класса: в верхней половине графика (положительные значения) – площадь земель, перешедшая в исследуемый класс из других классов, в нижней (отрицательные значения) — площадь, которая перешла из исследуемого класса в другие классы в конкретном году.

Рост доли площади пашни наблюдался с 1994 по 2000 гг. в основном за счет класса «земли, лишённые растительности» (рис. 2, а). Наиболее значимый прирост произошел при переходе от 1999 г. к 2000 г. в юго-восточной части бассейна. В том же районе наблюдается еще один пик прироста при переходе от 2017 г. к 2018 г. за счет земель класса «травянистая растительность». Сокращение доли пашни характерно для периода 1998–2004 гг. Причем в 1999 г. земли, расположенные в ос-

новном в долинах рек на севере бассейна (район р. Северский Донец), перешли в класс «древесная растительность», а в 2000–2004 гг. пахотные земли сменялись на урбанизированные территории.

Доля застроенных территорий монотонно увеличивалась на протяжении всего периода (рис. 2, б). Пик роста зафиксирован в 2000–2004 гг., когда наблюдалось активное расширение городов по всему бассейну за счет пашни и лесной растительности. С 2020 г. темпы перевода пашни под застройку снова увеличились, в основном рядом с крупными городами (г. Ростов-на-Дону, г. Ставрополь и т. д.).

Доля класса «земли, лишённые растительности» постоянно сокращалась (рис. 2, в). В 1999–2000 г. около 77 % всей площади, занимаемой этим классом, было переведено в основном под пашню (преимущественно на юго-востоке бассейна).

Площадь земель класса «водно-болотная растительность» увеличивалась в основном за счет водных объектов (рис. 2, г). Макси-

мальные изменения зафиксированы в 1994–1995 гг., 2005–2014 гг. Они отражают зарастание долин рек и водохранилищ по большей части в бассейне р. Западный Маныч. Доля класса сокращалась незначительно в основном за счет перехода в классы «водные поверхности» и «застроенные территории», имевшего место в дельте Дона.

Площадь класса «водные поверхности» увеличивалась в период 1994–1999 гг. за счет территорий пашни и древесной растительности (рис. 2, д). Изменения происходили по всей территории бассейна, но в основном в дельте Дона. С началом маловодного периода на Дону в 2007 г. отмечается незначительное сокращение доли водных поверхностей.

Доля площади травянистой растительности значительно сокращалась в 1999–2000 гг. и 2017–2022 гг. (рис. 2, е) (первый период относится к дельте Дона, второй затрагивает территорию Волгоградской и Ростовской областей). Изменения происходили за счет выведения из-под пара полей и роста лесов. В остальном заметны межгодовые переходы для сельскохозяйственных полей между состояниями «работы» и «отдыха».

Для древесной растительности наблюдаются два периода роста площади: 1998–2000 гг. и 2015–2021 гг. (рис. 2, ж). Увеличение происходило на всей территории бассейна за счет зарастания пустошей и полей, роста лесов в различных природоохранных территориях. Основное место увеличения доли площади древесной растительности – район р. Северский Донец.

Заключение

Анализ глобального набора данных о земельном покрове ESA CCI позволил установить основные закономерности и пространственные особенности изменений структуры землепользования в бассейне Нижнего Дона за период 1992–2022 гг.

Результаты сравнения глобального набора данных ESA CCI с информацией о земельном фонде Ростовской области позволил охарактери-

зовать качество карт земельного покрова как удовлетворительное. Среднеквадратичная ошибка определения структуры земельного фонда Ростовской области в течение всего периода 2008–2022 гг. не превышала 10 %.

В целом за весь исследуемый период было отмечено два отрезка времени, когда происходили наиболее сильные изменения земельного покрова в бассейне Нижнего Дона: это рубеж XX и XXI вв. и период с 2018 по 2022 гг. Доля пашни в бассейне Нижнего Дона увеличивалась за счет территорий, лишенных растительности, и земель с травянистой растительностью. Сокращение пашни происходило в основном за счет перевода ее в городские и застроенные территории, площадь которых росла на протяжении всего периода, наиболее интенсивно в 2000–2004 гг. «Земли, лишенные растительности» практически полностью перешли в класс «пашня». Для класса «древесная растительность» с 2017 г. наблюдается период роста занимаемой им площади.

Полученные результаты могут быть использованы в практике разработки стратегий устойчивого землепользования. Картографические материалы, отражающие изменения земельного покрова, являются информационной базой при планировании развития территорий и управлением ресурсами. Кроме того, данные о земельном покрове бассейне Нижнего Дона лягут в основу моделей оценки выноса веществ, поступающих с водосбора в реку, использование которых в свою очередь даст понимание причин загрязнения водных объектов региона.

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 125011200143-4 «Геоинформационные региональные модели и методы исследования систем 'водосбор-водоем'». При выполнении работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ямова А. А., Веселова М. Н., Коцур Е. В. Выявление и вовлечение в оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения юга Тюменской области: подходы, опыт, проблемы. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 1. С. 157–168. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-157-168.
2. Гонца Г. И., Комиссарова Е. В., Колесников А. А. Методика уточнения и обновления информации о лесных ресурсах посредством использования данных дистанционного зондирования и мобильных устройств. Вестник. 2025. Т. 30, № 1. С. 96–105. DOI 10.33764/2687-041X-2023-1-133-139.

3. Дубровин К. Н., Илларионова Л. В., Степанов А. С. Решение задач идентификации сельскохозяйственных культур и актуализации границ сельскохозяйственных полей (на примере Хабаровского муниципального района). Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 1. С. 48–58. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-48-58.
4. Land cover classification gridded maps from 1992 to present derived from satellite observation. Copernicus Climate Change Service (C3S) [Электронный ресурс]. Climate Data Store (CDS). 2019. URL: <https://doi.org/10.24381/cds.006f2c9a> (дата обращения: 06.11.2024).
5. Матишов Г. Г., Дашкевич Л. В., Титов В. В., Кириллова Е. Э. Анализ внутривековой природной изменчивости в Приазовье и на Нижнем Дону: причина маловодья. Наука Юга России. 2021. Т. 17, № 1. С. 13–23. DOI 10.7868/S25000640210102.
6. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B., Birch T., Hyde S. B., Mazzariello J. et al. Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data. 2022. Vol. 9, № 1. P. 1–17.
7. Defourny P., Lamarche C., Bontemps S., De Maet T., Van Bogaert E., Moreau I., Brockmann C., Boettcher M., Kirches G., Wevers J., Santoro M. Land Cover Climate Change Initiative – Product User Guide v2. Issue 2.0 [Электронный ресурс]. 2017. URL: http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (дата обращения: 06.11.2024).
8. Парфенова А. В., Кулыгин В. В. Исследование глобальных наборов данных о земельном покрове для оценки их соответствия условиям региона Нижнего Дона. Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2024. Т. 9. С. 64–73. DOI 10.23885/2500-123X-2024-2-9-64-73.
9. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2008 году». Под ред. С. Г. Курдюмова. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2009. 355 с.
10. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2009 году». Под ред. С. Г. Курдюмова. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2010. 371 с.
11. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2010 году». Под ред. С. Ф. Трифонова. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2011. 368 с.
12. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2011 году» / Под ред. А. А. Гребенщикова. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2012. 360 с.
13. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2012 году» / Под ред. А. А. Гребенщикова. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2013. 376 с.
14. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2013 году». Под ред. В. Г. Василенко. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2014. 378 с.
15. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2014 году». Под ред. В. Г. Василенко. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2015. 384 с.
16. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2015 году». Под ред. В. Г. Василенко. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2016. 369 с.
17. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2016 году». Под ред. В. Г. Гончарова, Г. А. Урбана. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2017. 369 с.
18. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2017 году». Под ред. В. Г. Гончарова, М. В. Фишкина. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2018. 366 с.
19. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2018 году» / Под ред. М. В. Фишкина. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2019. 370 с.
20. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2019 году». Под ред. М. В. Фишкина. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2020. 373 с.

21. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2020 году». Под ред. М. В. Фишкина. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2021. 377 с.
22. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2021 году». Под ред. М. В. Фишкина. Ростов н/Д. : Правительство Рост. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Рост. обл., 2022. 395 с.
23. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2023 году. М.: Росреестр, 2023. 180 с.

REFERENCES

1. Yamova A.A, Veselova M. N. & Kotsur E. V. (2025). Identification and involvement of unused agricultural lands into turnover: approaches, experience, problems. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30 (1), 157–168. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-157-168 [in Russian].
2. Gonets G. I., Komissarova E. V. & Kolesnikov A. A. (2025) Methodology for clarifying and updating information on forest resources through the use of remote sensing data and mobile devices. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30 (1), 96–105. DOI 10.33764/2687-041X-2023-1-133-139 [in Russian].
3. Dubrovin K. N., Illarionova L. V. & Stepanov A. S. (2025). Solving problems of crop identification and actualization of crop field boundaries (on the example of Khabarovsk municipal district). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30 (1), 48–58. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-48-58 [in Russian].
4. Land cover classification gridded maps from 1992 to present derived from satellite observation. Copernicus Climate Change Service (C3S). (2019). Climate Data Store (CDS). Retrieved from <https://doi.org/10.24381/cds.006f2c9a> (date of access: 06.11.2024).
5. Matishov G. G., Dashkevich L. V., Titov V. V. & Kirillova E. E. (2021). Analysis of intracentury environmental variability in the sea of Azov and Lower Don regions: the cause of low water period. *Nauka juga Rossii [Science of the south of Russia]*, 17 (1), 13–23. DOI 10.7868/S25000640210102 [in Russian].
6. Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B. & Mazzariello, J. (2022). Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 1–17.
7. Defourny, P., Lamarche, C., Bontemps, S., De Maet, T., Van Bogaert, E., Moreau, I., Brockmann, C., Boettcher, M., Kirches, G., Wevers, J. & Santoro, M. (2017). Land Cover Climate Change Initiative – Product User Guide v2. Issue 2.0. Retrieved from http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (date of access: 06.11.2024).
8. Parfenova A.V. & Kulygin V.V. (2024). Study of the global l and cover datasets to assess their compliance with the conditions of the Lower Don region. *Jekologija. Jekonomika. Informatika. Serija: Geoinformacionnye tehnologii i kosmiche-skij monitoring [Ecology. Economics. Computer Science. Series: Geoinformation Technologies and Space Monitoring]*, 9, 64–73. DOI 10.23885/2500-123X-2024-2-9-64-73 [in Russian].
9. Kurdyumov, S.G. (2009). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okružhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2008 godu» [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2008”]*. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
10. Kurdyumov, S.G. (2010). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okružhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2009 godu» [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2009”]*. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
11. Trifonov, S. F. (2011) *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okružhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2010 godu» [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2010”]*. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
12. Grebenshchikov A. A. (2012). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okružhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2011 godu» [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2011”]*. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
13. Grebenshchikov A. A. (2013). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okružhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2012 godu» [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2012”]*. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].

14. Vasilenko, V. G. (2014). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2013 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2013”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
15. Vasilenko, V. G. (2015). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2014 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2014”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
16. Vasilenko, V. G. (2016). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2015 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2015”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
17. Goncharov, V. G., Urban G. A. (2017). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2016 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2016”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region.
18. Goncharov, V. G., Fishkin, M. V. (2018). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2017 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2017”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region.
19. Fishkin, M. V. (2019). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2018 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2018”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
20. Fishkin, M. V. (2020). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2019 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2019”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
21. Fishkin, M. V. (2021). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2020 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2020”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
22. Fishkin, M. V. (2022). *Jekologicheskij vestnik Dona «O sostojanii okruzhajushhej sredy i prirodnyh resur-sov Rostovskoj oblasti v 2021 godu»* [Ecological Bulletin of the Don “On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2021”]. RnD: Government of Rostov Region, Ministry of Natural Resources and Ecology of Rostov Region. [in Russian].
23. State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2023. (2023). M.: Rosreestr. [in Russian].

Об авторах

Валерий Валерьевич Кулыгин – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией информационных технологий и математического моделирования ЮНЦ РАН.

Анна Васильевна Парфенова – инженер-исследователь отдела НИР и прикладных исследований ЮНЦ РАН.

Author details

Valerii V. Kulygin – Ph.D., Leading Researcher, Head of Laboratory of Information Technologies and Mathematical Modeling.

Anna V. Parfenova – Research Engineer, Department of R&D and Applied Research.

Получено / Received 28.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.08.2025

Принята к публикации / Accepted 17.09.2025

УДК 528.94:316.3(470.53)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-98-105>

Картографирование социальной инфраструктуры города Перми

Я. Р. Полякова^{1✉}, Н. А. Сторожук¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Российская Федерация
e-mail: yana.poljakova@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена подходам к картографированию социальной инфраструктуры города Перми на внутригородском уровне с применением современных методов геоинформационного анализа. Актуальность исследования обусловлена неравномерностью пространственного распределения объектов социальной инфраструктуры на территории города и ограничениями традиционных статистических подходов, недостаточно отражающих различия в обеспеченности населения социальными услугами. Цель работы заключается в оценке применимости различных методико-технологических подходов для анализа доступности, обеспеченности и загруженности объектов социальной инфраструктуры. Используются данные о населении жилых домов, модели дорожных графов, инструменты сетевого анализа и гексагональная сетка. Оценена временная доступность экстренных служб, определены их зоны обслуживания, выполнено картографирование плотности, загруженности и обеспеченности аптечных учреждений. Результаты выявляют выраженные дисбалансы внутригородских территорий и подтверждают эффективность применения сетевых методов и детализированных данных при анализе городской инфраструктуры. Предложенные подходы формируют универсальный инструмент для оценки состояния социальной инфраструктуры и могут быть использованы при планировании развития городской среды.

Ключевые слова: социальная инфраструктура, городская среда, геоинформационное картографирование, сетевой анализ, временная доступность, обеспеченность объектами, загруженность, пространственное распределение

Для цитирования:

Полякова Я. Р., Сторожук Н. А. Картографирование социальной инфраструктуры города Перми. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 98–105. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-98-105>

Mapping the social infrastructure of Perm city

Ya. R. Polyakova^{1✉}, N. A. Storozhuk¹,

¹ Perm State University, Perm, Russian Federation
e-mail: yana.poljakova@gmail.com

Abstract. The study explores methodological approaches to intra-urban mapping of Perm's social infrastructure using advanced geoinformation analysis techniques. Its relevance arises from the uneven spatial distribution of social facilities across the city and the shortcomings of conventional statistical methods, which fail to capture variations in population access to services. The primary objective is to assess the applicability of diverse methodological and technological frameworks for evaluating accessibility, provision levels, and utilization rates of social infrastructure objects. Data sources include residential population statistics, road graph models, network analysis tools, and hexagonal tessellation grids. The research encompasses temporal accessibility modeling for emergency services, delineation of service areas, and cartographic representation of density, load, and

provision for pharmacies. Findings reveal significant intra-urban disparities and validate the efficiency of network-based methods coupled with detailed data for infrastructure appraisal. The proposed framework offers an adaptable toolkit for social infrastructure evaluation, with direct implications for urban planning and development strategies.

Keywords: social infrastructure, urban environment, geoinformation mapping, network analysis, temporal accessibility, availability, congestion, spatial distribution

For citation:

Polyakova Ya. R., Storozhuk N. A. (2026). Mapping the social infrastructure of Perm city. *Vestnik SSU-GiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 98–105. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-98-105>

Введение

Социальная инфраструктура неотъемлемая часть городского пространства, формирует комфортную среду обитания и выступает индикатором качества жизни. Пространственное распределение объектов социальной инфраструктуры в городе неравномерно, что говорит о разном уровне обеспеченности населения социальными услугами. Традиционные методы, в основе которых заложен статистический анализ в разрезе административно-территориальных единиц, оказываются недостаточно эффективными для выявления различий в обеспеченности такими услугами.

В современной научной литературе все многообразие картографирования социальной инфраструктуры можно разделить на четыре аспекта: сети, доступность, обеспеченность и использование [1]. Несмотря на то, что указанные аспекты достаточно разработаны в теории картографирования социальной инфраструктуры, остаются вопросы, которые напрямую касаются внутригородских исследований. К ним относятся многообразие подходов, связанных с выбором или созданием интегральных показателей для оценки объектов социальной инфраструктуры, а также территориальных единиц картографирования [2, 3, 4].

Кроме того, в городских исследованиях часто используют методы пространственного анализа. В качестве примеров можно привести работы по исследованию пешеходной доступности ключевых участков, оценки парковых зон и городского рельсового транспорта с помощью сетевого и буферного анализа, а также с использованием сеток [5, 6, 7].

В тоже время вышеперечисленные исследования не решают задачу расчета норматив-

ной или фактической обеспеченности населения, что оставляет открытым вопрос покрытия реальных потребностей жителей услугами различного профиля.

Так, различные показатели отображаются в разных единицах измерения (количество объектов, проценты, километры, минуты и т. д.), в то время как выбор методики расчётов связан с необходимостью использования разных показателей: показатели обеспеченности связаны с демографическими данными, а пространственные – с транспортной сетью [2, 8].

Стоит отметить, что картографирование социальной инфраструктуры представлено в Комплексном атласе города Перми, в разделе «Социальная инфраструктура» картами: образовательных учреждений (дошкольного, школьного, среднего профессионального и высшего образования), медицинских учреждений, обеспеченности медицинским персоналом, учреждений культуры и спортивных объектов [9, 10]. В рамках настоящей работы по картографированию социальной инфраструктуры города Перми используются исходные данные и реализуются подходы, которые в состав изданного атласа не включались.

Таким образом, в работе оценивается применимость различных подходов для картографирования объектов социальной инфраструктуры на примере города Перми. В качестве объектов социальной инфраструктуры выбраны: станции скорой медицинской помощи, пожарные депо и аптеки.

Методы и материалы

Для анализа обеспеченности объектами социальной инфраструктуры и их загруженности необходимы данные о численности

населения. Так как Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю [11] предоставляет официальные статистические данные в разрезе административных районов, что недостаточно для внутригородского анализа, производился расчет численности населения отдельных жилых домов.

В российской и международной практике оценка численности населения жилых зданий преимущественно основывается на показателе общей жилой площади на заданной территории. Для её определения используется площадь контуров зданий, полученная по данным дистанционного зондирования Земли или из открытых векторных источников. Искомый параметр рассчитывается путем умножения площади контура на количество этажей. Затем общая жилая площадь здания делится на норматив жилой площади, приходящейся на одного человека, что и позволяет получить оценочную численность населения, проживающего в конкретном доме [12, 13, 14].

Так, для расчета численности населения по жилым домам использовались векторные полигональные слои зданий OpenStreetMap, а также аналитические данные Фонда «Реформа ЖКХ», которые в том числе содержат информацию об общей жилой площади зданий на часть территории Перми [15]. Расчет производился на основе нормы общей площади жилого помещения на одного жителя, которая усредненно составляет 24 м² (Федеральный закон от 30.12.2012 № 283-ФЗ. – URL: <https://www.consultant.ru>. – Текст: электронный). Численность населения (S) в конкретном доме определялась по формуле:

$$S = AN / 24, \quad (1)$$

где S – численность населения в конкретном доме; AN – общая жилая площадь здания в м²; 24 – средняя жилая площадь, приходящаяся на одного жителя согласно нормативу.

Полученные данные использовались для следующего анализа обеспеченности населения в зонах обслуживания социальных объектов.

Векторные слои объектов социальной инфраструктуры создавались на основе данных об их местоположении: пожарные части – УГПС Пермского края [16] и онлайн карто-

графический сервис Яндекс.Карты [17], станции скорой медицинской помощи – ГБУЗ «Пермская станция СМП» [18], аптечные учреждения – Яндекс.Карты [17].

Для расчета временной доступности объектов социальной инфраструктуры создан дорожный граф, который является моделью дорожной сети с атрибутами скорости движения для разных дорожных участков.

Построение графа осуществлялось на основе данных OpenStreetMap [19]. Из линейного слоя дорожной сети исключались пешеходные и велосипедные пути. Ключевой характеристикой дорожного графа стала максимальная разрешенная скорость движения, в соответствии с классификацией дорог [20]. Для моделирования условий в часы пик создан альтернативный граф, где для улиц с высокой нагрузкой, выявленных посредством сервиса «Яндекс.Пробки» [21], скорость снижена до 35 км/ч, что соответствует средней скорости движения автомобилей в пробках [22].

Временная доступность объектов экстренных служб, таких как станции скорой медицинской помощи и частей пожарной охраны, рассчитывалась с использованием сетевого анализа. В результате работы инструмента сформировались растры временной доступности для пожарных частей и станций скорой помощи.

Для определения зон обслуживания пожарных частей и станций скорой помощи рассчитаны кратчайшие временные пути между станциями скорой помощи или пожарного депо и центроидами жилых домов. Для каждого дома определена ближайшая станция (часть), на основе чего построены полигоны Вороного, формирующие итоговые зоны обслуживания. Для каждой зоны рассчитана численность обслуживаемого населения.

Для проведения анализа пространственного распределения аптечных учреждений была использована гексагональная сетка размером 1 000 м. Выбор данного размера обусловлен тем, что радиус вписанной окружности (500 м) соответствует нормативному радиусу обслуживания аптечных учреждений (СП 42.13330.2016. – URL: <https://www.consultant.ru>. – Текст: электронный). Количество аптек в каждой ячейке гексагона определялось с помощью инструментов пространственного анализа, что поз-

волило создать картограмму плотности распределения аптек (количество на 1 км²). Загруженность аптечных учреждений оценивалась через расчет численности населения, проживающего в зоне их шаговой доступности.

Для оценки обеспеченности населения аптеками использовался норматив, согласно которому одна аптека в среднем обслуживает 2 279 человек (Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 13 февраля 2013 г. № 66. – URL: <https://www.consultant.ru>. – Текст: электронный). На основе гексагональной сетки для каждой ячейки был рассчитан коэффициент обеспеченности (К) по формуле:

$$K = 2279N / S, \quad (2)$$

где К – коэффициент обеспеченности; 2279 – среднее количество человек, обслуживаемого одной аптекой, согласно нормативу; N – количество аптек, S – численность населения в ячейке.

Для анализа уровней обеспеченности была использована следующая классификация:

- низкая обеспеченность ($K < 0,75$): дефицит аптечных учреждений относительно норматива;
- средняя обеспеченность ($0,75 \leq K \leq 1,25$): уровень обеспеченности близок к нормативному;
- высокая обеспеченность ($K > 1,25$): количество аптек достаточно или избыточно.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенного исследования создана серия тематических карт, отображающая пространственные закономерности размещения, доступности и обеспеченности объектов социальной инфраструктуры г. Перми.

Картографирование временной доступности экстренных служб было осуществлено в двух вариантах: для «идеальных условий» (рис. 1) и для «часов пик» (рис. 2). В результате получено четыре карты, отображающие пространственное распределение времени прибытия экстренных служб. В силу того, что карты отображают аналогичные аспекты, представлены две карты, в качестве примера.

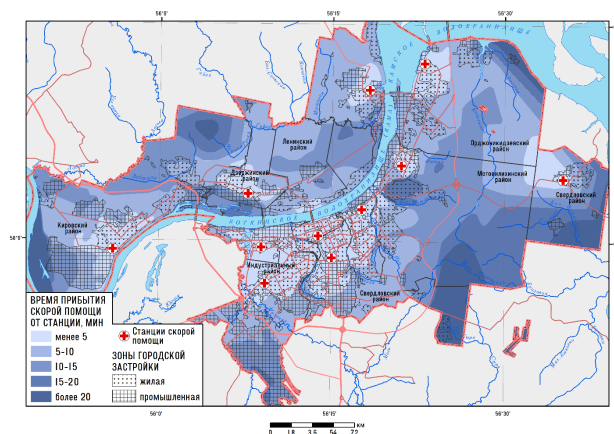


Рис. 1. Расчетное время прибытия скорой медицинской помощи в условиях обычной загруженности дорожной сети

Способ картографического изображения для временной доступности – псевдоизолинии с послышной окраской, что обеспечивает понятное восприятие территорий с разным уровнем доступности. Нормативной временной границей на карте доступности пожарной охраны города Перми будет значение 10 минут (Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. – URL: <https://www.consultant.ru>. – Текст: электронный), для станций скорой помощи – 20 минут (Приказ Минздрава России от 20 июня 2013 г. № 388н. – URL: <https://www.consultant.ru>. – Текст: электронный).

Анализ двух сценариев карт выявил зависимость времени прибытия экстренных служб от уровня загруженности дорожно-транспортной сети.

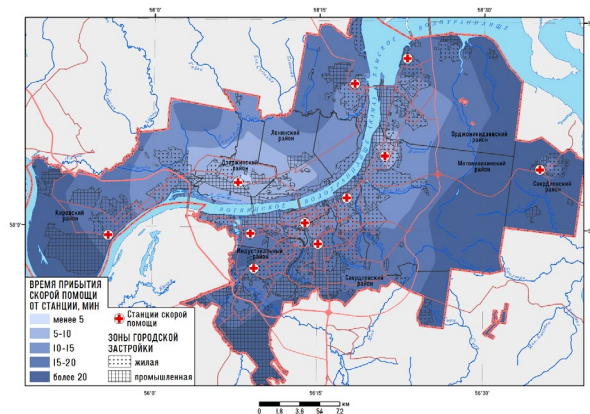


Рис. 2. Расчетное время прибытия скорой медицинской помощи в условиях часа пик

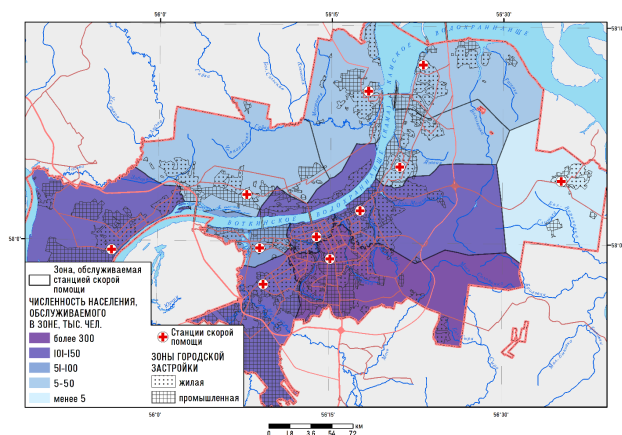


Рис. 3. Зоны обслуживания станциями скорой медицинской помощи г. Перми

Ряд станций скорой помощи и пожарных депо, расположенных в центральных районах (например, подстанция Свердловского района), обслуживают население, численность которого в несколько раз превышает нагрузку на станции в периферийных зонах.

Применение гексагональной сетки для пространственного анализа позволяет провести более эффективный анализ объектов социальной инфраструктуры: распределение, загруженность и обеспеченность.

Картограмма плотности аптек позволяет выделить территории с высокой концентрацией аптечных учреждений в центральной части города, в то время как в спальнях районах наблюдаются зоны с их низкой плотностью или полным отсутствием (рис. 4).

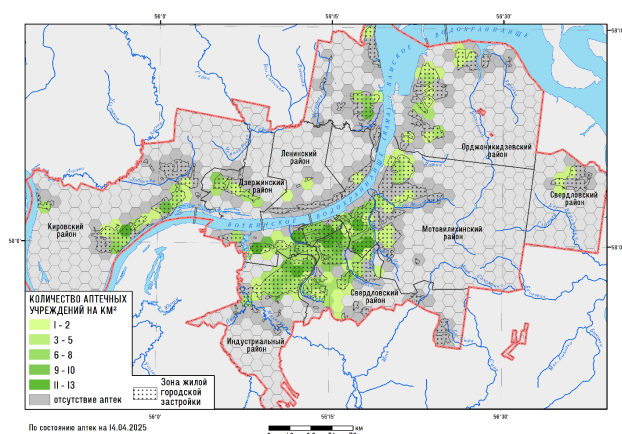


Рис. 4. Пространственное распределение аптечных учреждений г. Перми

На карте загруженности аптечных учреждений (рис. 5) отображены зоны обслуживания аптек в шаговой доступности (500 м), а также численность населения, приходящегося на каждую аптеку. Это позволяет оценить не только плотность аптечной сети, но и нагрузку на каждую аптечную точку.

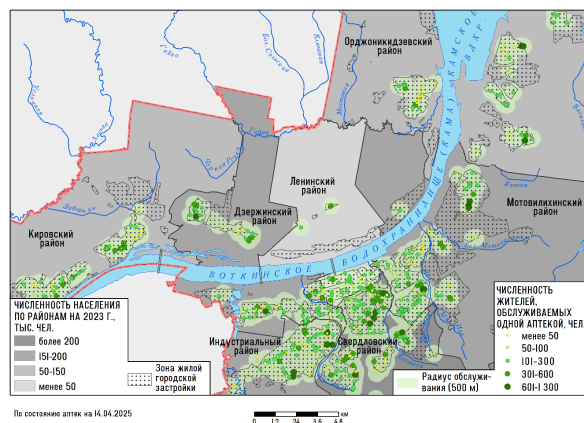


Рис. 5. Загруженность аптечных учреждений г. Перми

Классификация уровня обеспеченности населения аптечными пунктами на карте по принципу «светофора» (рис. 6) позволяет оперативно идентифицировать проблемные территории. На карте выделены территории с низкой обеспеченностью (красные ячейки), требующие первоочередного внимания при планировании развития аптечной сети, и зоны с избыточной обеспеченностью (зеленые ячейки).

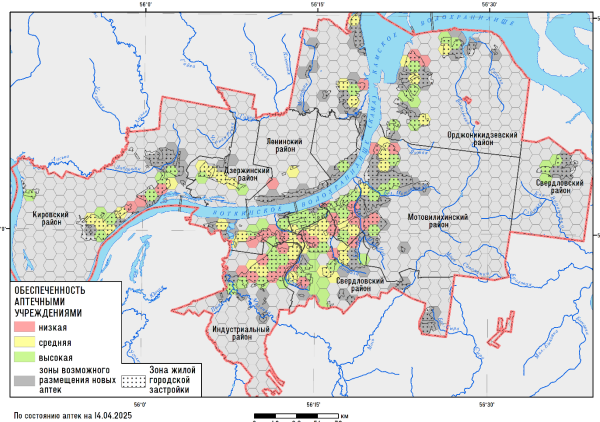


Рис. 6. Обеспеченность населения г. Перми аптечными учреждениями

Таким образом, описанные подходы могут использоваться для фиксации текущего состояния социальной инфраструктуры, а также выявлять проблемные территории и планировать изменения, в соответствии с выявленными пространственными закономерностями, что несет в себе ряд преимуществ.

Во-первых, такой подход дает возможность одновременно провести оценку доступности, обеспеченности и загруженности объектов. Использование данных о численности населения, привязанных к жилым домам, обеспечивает высокую детализацию и позволяет рассчитывать точные количественные показатели.

Во-вторых, использование дорожного графа и различных сценариев повышает практическую значимость работы. Анализ пространственных характеристик, относящихся к распределению объектов в городе и времени их достижения, основанный на дорожном графе, дает репрезентативные результаты в каждом отдельном случае.

В-третьих, использование гексагональной сетки является оптимальным решением для выявления внутригородских различий при отсутствии административно-территориального деления населенного пункта или сложностях в выборе территориальных единиц картографирования.

Вместе с тем, имеется ряд ограничений. Например, моделирование сценариев прибытия служб экстренной помощи не учитывает возможность выезда бригад скорой помощи не со станций, а с точек завершения предыдущих вызовов. Также расчеты основаны на нормативных скоростях, а не на данных реального транспорта.

Заключение

В статье описаны и апробированы подходы к картографированию объектов городской социальной инфраструктуры, нацеленные на оценку временной доступности, пространственного распределения и демографической нагрузки. На примере г. Перми подтверждена их эффективность.

Данные подходы основаны на использовании инструментов сетевого анализа, использовании оверлейных операций, пространственных отношений и визуализации данных с помощью гексагональной сетки, позволяют проводить анализ на внутригородском уровне и выявлять значительные дисбалансы в обеспечении населения социальными объектами и услугами на основе численности населения конкретной территории.

Реализация подходов и созданная серия карт на их основе может служить эффективным инструментом для идентификации проблемных территорий и оптимизации размещения новых социальных объектов. Результаты могут быть использованы органами местного самоуправления и юридическими лицами при планировании развития городской среды.

Универсальность заключается в том, что данные подходы могут быть адаптированы для многих аспектов городской инфраструктуры и территорий, поскольку отсутствует привязка к административно-территориальному делению, а сами объекты имеют точечную локализацию в пространстве.

Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с включением в анализ других типов социальных объектов (образование, спорт, культура и др.), использованием данных реальных передвижений транспортных средств, а также учетом мобильности населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прохорова Е. А. Социально-экономические карты: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения. М.: «КДУ», «Добросвет», 2018. 228 с. ISBN 978-5-7913-1035-4.
2. Строкова Е. А., Ершов А. В., Чернов А. В. Анализ обеспеченности населенного пункта объектами социальной инфраструктуры с применением геоинформационных технологий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 7 : Международная научно-технологическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. № 1. – С. 135–143
3. Мхитарян С. В., Мусатова Ж. Б., Муртузалиева Т. В., Тимохина Г. С., Широченская И. П. Методика оценки транспортной доступности капитальных объектов мегаполиса на основе геоинформационных данных. МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2021. № 4. С. 400–415
4. Аникин В. В., Долгачева А. С., Долгачева Т. А., Тесленок С. А. Картографирование плотности жилых помещений для оценки социальной инфраструктуры. Огарёв-Online. 2022. №4 (173). 2 с.

5. Liu Q., Li Z., Tang Q., Lin L., Deng T. Research on Accessibility Optimization of Emergency Shelters in Chengdu Ring Eco-zone from the Perspective of Resilient City. *Journal of Innovation and Development*. 2023. Vol. 4 (3). P. 82–88.
6. Zuo Y., Ding X., Wei Y., Wang W., Wang M. GIS-based accessibility analysis of urban park green space landscape. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-13750-5.
7. Zhu J., Rui X. Spatiotemporal Dynamics and Multi-Scale Equity Evaluation of Urban Rail Accessibility: Evidence from Hangzhou. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2025. Vol. 14 (9). DOI: 10.3390/ijgi14090361.
8. Хотман О. В., Багирова А. П. Социальное картографирование пространства мегаполиса: микрорайоны как места проживания, места приложения труда и места досуговой активности жителей. *Социологический журнал*. 2020. № 2.
9. Атлас города Перми. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2025. 108 с.
10. Перминова Е. С., Полякова Я. Р., Пьянков С. В., Шихов А. Н. Комплексное картографирование городов на примере создания Атласа города Перми. *Геодезия и картография*. 2025. № 10. С. 34–44. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1024-10-34-44.
11. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю [Электронный ресурс]. URL: <https://59.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 22.11.2025).
12. Duman S., Ünsal Ö., Zaman S. The Clustering of the Population at Building Scale in Bursa City (Türkiye). *Sustainability*. 2024. Vol. 16. DOI: 10.3390/su16198615.
13. Pajares E., Muñoz Nieto R., Meng L., Wulffhorst G. Population Disaggregation on the Building Level Based on Outdated Census Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10 (10). DOI: 10.3390/ijgi10100662.
14. Глозман О.С, Крашенинников И.А. Плотность городской ткани и население жилых кварталов. *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. Вып. 4. С. 84–87.
15. Публично-правовая компания «Фонд развития территорий» [Электронный ресурс]. URL: <https://фрт.рф/> (дата обращения: 22.11.2025).
16. Управление гражданской защиты населения Пермского края. Пожарные части [Электронный ресурс]. URL: <https://ugps.permkrai.ru/ob-upravlenii/podchinennye-podrazdeleniya/pozharnye-chasti> (дата обращения: 16.05.2025).
17. Яндекс.Карты. Город Пермь [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/50/perm/?ll=56.298103%2C58.095912&z=14> (дата обращения: 24.04.2025).
18. Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Пермского края «Пермская станция скорой медицинской помощи». Контакты администрации, адреса подстанций. [Электронный ресурс]. URL: <https://perm-03.ru/specialists.html> (дата обращения: 16.05.2025).
19. Overpass Turbo – инструмент работы с данными OpenStreetMap [Электронный ресурс]. URL: <https://overpass-turbo.eu/> (дата обращения: 31.05.2025).
20. GIS-Lab. Базовая оценка транспортной доступности средствами GRASS GIS и QGIS [Электронный ресурс]. URL: https://wiki.gis-lab.info/w/Базовая_оценка_транспортной_доступности_средствами_GRASS_GIS_и_QGIS (дата обращения: 24.05.2025).
21. Яндекс.Карты: Пробки [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/probki/> (дата обращения: 01.04.2025).
22. Исследование городского трафика: Москва, 2017 [Электронный ресурс]. Яндекс. URL: https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow_traffic_2017 (дата обращения: 23.05.2025).

REFERENCES

1. Prohorova, E.A. (2018). *Social'no-jekonomicheskie karty [Socio-economic maps]*. Moscow: «KDU», 228 p. [in Russian].
2. Strokova, E. A., Ershov, A. V., Chernov, A. V. (2022). Analysis of the availability of social infrastructure facilities in a locality using geoinformation technologies. In *Interespo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia] Vol. 1, no 1*. (pp. 135-143). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
3. Mhitarjan, S. V., Musatova, Zh. B., Murtuzaliev, T. V., Timohina, G. S., Shirochenskaja, I. P. (2021). Methodology for assessing the transport accessibility of capital facilities in a megacity based on geoinformation data. *MIR (Modernizacija. Innovacii. Razvitie) [MIR (Modernization. Innovation. Development)]*, Vol. 12, no 4, 400-415 [in Russian].

4. Anikin, V. V., Dolgacheva, A. S., Dolgacheva, T. A., Teslenok, S. A. (2022). Mapping residential density to assess social infrastructure. *Ogarjov-Online [Ogarev-Online]*, Vol. 10, no 4, 2 [in Russian].
5. Liu, Q., Li, Z., Tang, Q., Lin, L., Deng, T. (2023). Research on Accessibility Optimization of Emergency Shelters in Chengdu Ring Eco-zone from the Perspective of Resilient City. *Journal of Innovation and Development*, 4 (3), 82–88.
6. Zuo, Y., Ding, X., Wei, Y., Wang, W., Wang, M. (2025). GIS-based accessibility analysis of urban park green space landscape. *Scientific Reports*, 15. DOI: 10.1038/s41598-025-13750-5.
7. Zhu, J., Rui, X. (2025). Spatiotemporal Dynamics and Multi-Scale Equity Evaluation of Urban Rail Accessibility: Evidence from Hangzhou. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14 (9). DOI: 10.3390/ijgi14090361.
8. Notman, O. V., Bagirova, A. P. (2020). Social mapping of the metropolis space: microdistricts as places of residence, places of employment, and places of leisure activity for residents. *Sociologicheskij zhurnal [The Sociological Journal]*, Vol. 26, no 2, 124-143 [in Russian].
9. Atlas of the city of Perm. Perm: Perm State University, 2025. 108 p. [in Russian].
10. Perminova, E. S., Poljakova, Ja. R., P'jankov, S. V., Shihov, A. N. (2025). Comprehensive mapping of cities using the example of creating the Atlas of the City of Perm. *Geodezija i kartografija [Geodesy and cartography]*, no 10, 34-44 [in Russian]. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1024-10-34-44.
11. Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Perm Region. Retrieved from <https://59.rosstat.gov.ru/>. [in Russian].
12. Duman, S., Ünsal, Ö., Zaman, S. (2024). The Clustering of the Population at Building Scale in Bursa City (Türkiye). *Sustainability*, 16. DOI: 10.3390/su16198615.
13. Pajares, E., Muñoz Nieto, R., Meng, L., Wulfhorst, G. (2021). Population Disaggregation on the Building Level Based on Outdated Census Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (10). DOI: 10.3390/ijgi10100662.
14. Glozman, O.S., Krashennikov, I.A. (2018). Density of urban fabric and population of residential areas. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. [Academia. Architecture and Construction]*, 4, 84–87 [in Russian].
15. Public Law Company Territorial Development Fund. Retrieved from <https://фпр.рф/>. [in Russian].
16. Department of Civil Protection of the Perm Region. Fire Departments. Retrieved from <https://ugps.permkrai.ru/ob-upravlenii/podchinennye-podrazdeleniya/pozharnye-chasti>. [in Russian].
17. Yandex.Maps. City of Perm. Retrieved from <https://yandex.ru/maps/50/perm/?ll=56.298103%2C58.095912&z=14>. [in Russian].
18. Perm Ambulance Station, State Budgetary Healthcare Institution of the Perm Region. Administration contacts and substations addresses. Retrieved from <https://perm-03.ru/specialists.html>. [in Russian].
19. Overpass Turbo is a tool for working with OpenStreetMap data. Retrieved from <https://overpass-turbo.eu/>. [in Russian].
20. GIS-Lab. Basic assessment of transport accessibility using GRASS GIS and QGIS. Retrieved from https://wiki.gis-lab.info/w/Базовая_оценка_транспортной_доступности_средствами_GRASS_GIS_и_QGIS. [in Russian].
21. Yandex.Maps: Traffic jams. Retrieved from <https://yandex.ru/maps/probki/>. [in Russian].
22. Urban Traffic Research: Moscow, 2017 // Yandex. Retrieved from https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow_traffic_2017. [in Russian].

Об авторах

Яна Рафаиловна Полякова – старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики.
Надежда Андреевна Сторожук – магистрант кафедры картографии и геоинформатики.

Author details

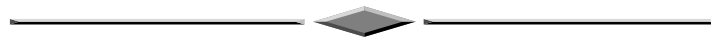
Yana R. Polyakova – Senior Lecturer, Department of Cartography and Geoinformatics.
Nadezhda A. Storozhuk – MS, Department of Cartography and Geoinformatics.

Получено / Received 04.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.01.2026

Принята к публикации / Accepted 18.02.2026

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ



УДК 528.44:69

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-106-114>

Предложения по проведению деформационной паспортизации объектов капитального строительства

Е. И. Аврунев¹, И. А. Гиниятов¹, А. И. Гиниятов²✉

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

² Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: kadastr-204@yandex.ru ¹

Аннотация. Обоснована актуальность и необходимость для объектов капитального строительства (ОКС), расположенных в зонах неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений, активной антропогенной и техногенной нагрузки, значительного сейсмического воздействия, проведения деформационной паспортизации, используя данные деформационного мониторинга на всем жизненном цикле существования ОКС. В результате реализации такой технологической процедуры предлагается сформировать деформационные паспорта (ДП ОКС) для каждого объекта, содержащие всю необходимую информацию об их состоянии. Разработана структура и содержание основных разделов ДП ОКС, предложен математический алгоритм обработки геодезических измерений, позволяющий достоверно определять параметры деформаций, сравнивать их с нормативно-установленными предельными значениями и делать обоснованные заключения о возможности безопасного функционирования объектов. Использовать информацию, содержащуюся в ДП ОКС, возможно также в Едином государственном реестре недвижимости (ЕГРН) и Национальной системе пространственных данных (НСПД).

Ключевые слова: геодезические работы, геометрическое нивелирование, средняя квадратическая ошибка, параметры, деформация

Для цитирования:

Аврунев Е. И., Гиниятов И. А., Гиниятов А. И. Предложения по проведению деформационной паспортизации объектов капитального строительства. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 106–114. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-106-114>

Guidelines for deformation monitoring and passportization of capital construction facilities

E. I. Avrunev¹, I. A. Giniyatov¹, A. I. Giniyatov²✉

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

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: kadastr-204@yandex.ru

Abstract. The study establishes the necessity of deformation passportization for all capital construction facilities (CCFs) situated in zones of adverse physical and geological processes, intensive anthropogenic and

technogenic loads, or high seismic risk, to enable comprehensive deformation monitoring across their full life cycle. The proposed procedure generates a deformation passport (DP) incorporating essential data on the spatial state of CCFs. Authors delineate the structure and content of key DP sections and introduce a mathematical algorithm for geodetic data processing. The algorithm quantifies deformation parameters, benchmarks them against regulatory thresholds, and delivers a robust evaluation of safe CCF operation throughout their lifecycle. DP data are recommended for incorporation as supplementary CCF attributes in the Unified State Register of Real Estate and National Spatial Data System.

Keywords: geodetic works, geometric leveling, average square error, parameters, deformation

For citation:

Avrunev E. I., Giniyatov I. A., Giniyatov A. I. (2026). Guidelines for deformation monitoring and passportization of capital construction facilities. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 106–114. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-106-114>

Введение

Практически все объекты капитального строительства и, в частности, здания и сооружения, в течение своего жизненного цикла, начиная с момента строительства и до прекращения существования, подвержены разного рода осадкам и деформациям, которые возникают под действием целого ряда причин природного, антропогенного либо техногенного характера [1–8]. В качестве таковых могут выступать: внешние нагрузки, имеющие статический (вес конструкций, полезная нагрузка) или динамический (ветер, сейсмическое воздействие) характер; внутренние напряжения, вызванные неравномерным нагревом, усадкой бетона, ползучестью материалов, а также ошибками проектирования и строительства; изменения свойств материалов; воздействие окружающей среды, представляющее собой влияния влаги, температуры, химических и биологических веществ [5, 9–11].

Под деформацией ОКС принято понимать изменение его геометрических параметров, которое может оказать существенное влияние на безопасное функционирование и привести, в ряде случаев, к катастрофической фазе – полному разрушению.

Действующие нормативные документы, регламентирующие наблюдения за деформациями ОКС (ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Введ. 2024–05–01. М.: Стандартинформ. 2020.–

69 с.; ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. Введ. 2021–01–01. М.: Стандартинформ. 2020.– 15 с.; СО 153-34.21.322-2003 Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – Утвержден 2003-06-30. М.: Центр производственно-технической информации энергопредприятий и технического обучения ОРГРЭС. 2005. 49 с.), предполагают осуществление регулярного деформационного мониторинга [12–16]. Как правило, в настоящее время деформационный мониторинг строящихся ОКС осуществляется с момента начала строительства и в течение всего периода эксплуатации до момента стабилизации деформаций.

Однако, в ряде случаев, в территориальных образованиях, имеют место зоны неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений, активной антропогенной и техногенной нагрузки, а также для всего территориального образования значительного сейсмического воздействия. В такой ситуации авторами предлагается осуществлять деформационный мониторинг всей совокупности ОКС, расположенных в таких зонах, на протяжении всего жизненного цикла их существования и, соответственно, ввести новый термин – деформационная паспортизация.

Результатом деформационной паспортизации должен стать деформационный пас-

порт (ДП), который составляется для всех ОКС, находящихся в зоне возможных деформационных процессов. Информация, которая будет содержаться в ДП, по мнению авторов, должна быть внесена в виде дополнительных характеристик ОКС в ЕГРН и НСПД и использована соответствующими производственными организациями для проведения, в случае необходимости, мероприятий по обеспечению безопасного функционирования ОКС.

Таким образом, целью данной работы является разработка структуры и содержания деформационного паспорта ОКС, на основании которого возможно сделать научно-обоснованное заключение о возможности его безопасного функционирования на всем этапе его жизненного цикла.

Методы и материалы

Материалами для исследования послужили нормативно-методические документы, регламентирующие осуществление деформационного мониторинга зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения (ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Введ. 2024-05-01. – М.: Стандартинформ. 2020.– 69 с.; ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. – Введ. 2021-01-01.– М.: Стандартинформ. 2020.– 15 с.; СО 153-34.21.322-2003 Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций.- Утвержден 2003-06-30. – М.: Центр производственно-технической информации энергопредприятий и технического обучения ОРГРЭС. 2005.- 49 с.), руководство по наблюдениям

за деформациями оснований зданий и сооружений [12], а также материалы, полученные в результате выполнения конкретных экспериментальных работ, в том числе на одном из ОКС, расположенном в г. Новосибирске [3].

Результаты и обсуждение

Действующая нормативно-техническая база деформационного мониторинга ОКС регламентирует его осуществление в период строительства и эксплуатации зданий и сооружений, устанавливает параметры используемого измерительного технологического оборудования и нормативные допуски на предельно-напряженное состояние конструкции, исходя из их целевого назначения, технологии строительства и характера грунтов, являющихся основанием фундамента. В качестве результата деформационного мониторинга (если определяются только вертикальные деформации) выступают: абсолютные и относительные осадки, продольные и поперечные крены и выгибы фундамента ОКС, а также их соответствие установленным допускам.

Вся эта информация, а также идентификационные номера и местоположение включённых в деформационную паспортизацию ОКС, должна содержаться в соответствующем деформационном паспорте.

Исходя из вышеизложенного, структуру деформационного паспорта можно представить в виде следующих разделов.

1. Титульный лист, включающий в себя информацию об идентификационном номере ОКС, который он получил на этапе определения зоны неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений, определяемых деформациях (вертикальных, горизонтальных), сведения о заказчике и исполнителе работ (рис. 1).

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ОКС № 1	
ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ	Лист 1-1
1. Местоположение ОКС: Идентификационный номер ОКС № 1, Кадастровый номер ОКС (если он поставлен на ГКУ) – земельный участок с кадастровым номером 54:35:3004001:460 по адресу: Российская Федерация, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Вязов, 13.	
2. Сведения о заказчике работ: Генеральный директор АОЗТ «Строительная компания "Ежевика"» И. И. Иванов (фамилия, имя, отчество (при наличии) физического лица, полное наименование юридического лица, органа государственной власти, органа местного самоуправления, иностранного юридического лица с указанием страны его регистрации (инкорпорации))	
2. Сведения об исполнителе работ: Почтовый и юридический адрес организации, выполняющей работы по составлению деформационного паспорта ОКС: 630027, г. Новосибирск, ул. Геодезическая, д. 3. ООО «ГЕОСИТИ»	
3. Определение <u>вертикальных</u> - горизонтальных деформаций ОКС (нужное подчеркнуть)	

Рис. 1. Титульный лист деформационного паспорта

2. Сведения об используемой типовой технологии и измерительном технологическом оборудовании при выполнении геодезических измерений, на основании которых определяются параметры деформаций ОКС и их соответствие требованиям действующих нормативных документов (рис. 2).

3. Схема геодезических измерений, включающая местоположение на растровом материале исходных реперов и определяемых деформационных марок на теле контролируемого ОКС; полученные и допустимые невязки выполненных геодезических измерений (рис. 3).

Следует отметить, что, к сожалению, в настоящее время, при выполнении геодезических

измерений допускаются бесконтрольные определения в виде висячих сетей геометрического нивелирования и отсутствует анализ стабильности в пространстве исходных реперов. Такая ситуация обуславливает возникновение грубых ошибок, которые искажают результаты деформационного мониторинга и могут привести к катастрофическим последствиям.

4. Параметры деформаций, которые для случая определения вертикальных деформаций ОКС, включают в себя абсолютные и относительные осадки деформационных марок – d , их СКО – md , скорости развития деформационного процесса – Vd (при условии, что осадки являются значимыми величинами), интервал времен (рис. 4).

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ОКС № 1	
ТИПОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	Лист 1-2
1. Исходная геодезическая основа: <i>стенные реперы, отметки которых получены из геометрического нивелирования II класса</i>	
2. Система высот для математической обработки результатов геодезических измерений: <i>условная</i>	
3. Способ выполнения геодезических измерений: <i>геометрическое нивелирование I класса короткими лучами</i>	
3. Измерительное технологическое оборудование: <i>цифровой нивелир DiNi (07) № 171435, СКО измерения превышения на станции $t=0,05$ мм.</i>	
4. Программное обеспечение для математической обработки результатов измерений: <i>Программный комплекс Кредо-Дат</i>	
5. Интервал времени между циклами геодезических измерений: $\Delta t=30$ дней	
6. Система нормативных допусков на точность выполнения геодезических измерений и определения параметров деформаций ОКС в зависимости от его целевого назначения и характера грунтов на котором он расположен: -----	

Рис. 2. Информация об используемой типовой технологии, применяемой при выполнении геодезических измерений для подготовки ДП ОКС

5. Параметры деформаций, которые для случая определения только вертикальных деформаций ОКС, включают в себя абсолютные и относительные крены k_{i-j} , абсолютные и относительные выгибы b_{i-j} и соответствующие требования действующих нормативных документов к их величинам (при условии, что осадки ОКС являются значимыми величинами).

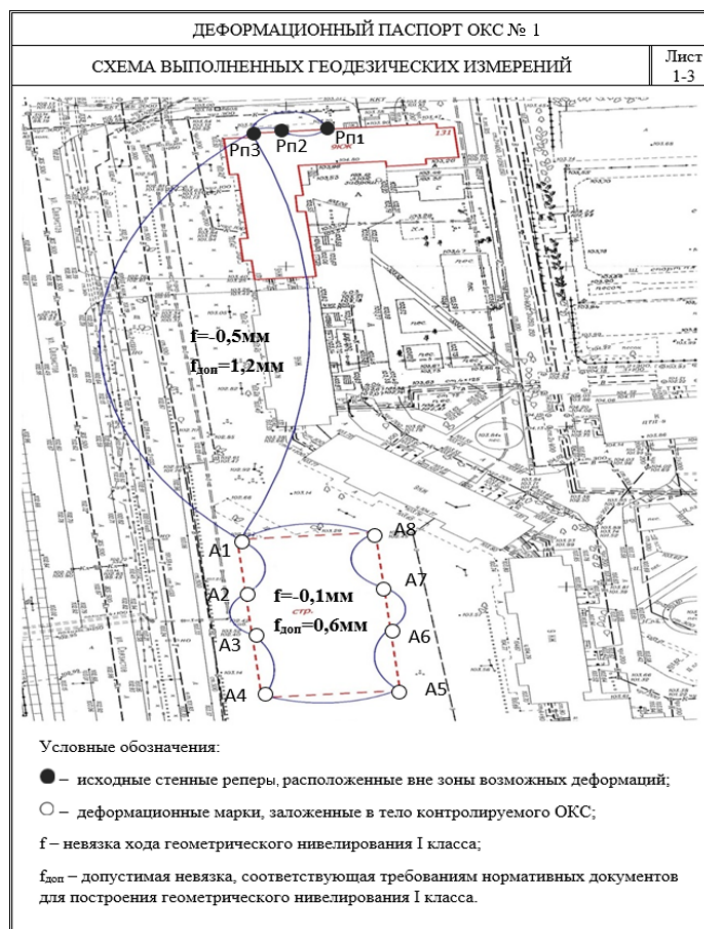


Рис. 3. Схема выполненных геодезических измерений

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ОКС № 1								Лист № 1-4
Параметры вертикальных деформаций ОКС (мм)								
Абсолютные осадки между циклами I-II ($\Delta t=30$ дней)								
№ ДМ	1	2	3	4	5	6	7	8
d	-0,4	0,0	-2,8	-3,9	-2,1	-2,0	-4,1	-2,8
m _d	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
V	-		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Норматив на d	Требование нормативных документов исходя из класса ОКС и характера грунтов, на которых он расположен							
Относительные осадки между циклами II-III ($\Delta t=25$ дней)								
d	-0,2	+0,1	-2,5	-2,2	-2,0	-2,3	-1,0	-4,5
m _d	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
V	-		0,1	-	0,1	-		
Норматив на d	Требование нормативных документов исходя из класса ОКС и характера грунтов, на которых он расположен							
Абсолютные осадки между циклами I-III ($\Delta t=55$ дней)								
d	-0,6	+0,1	-5,3	-6,1	-4,1	-4,3	-5,1	-7,3
m _d	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
V	-		0,1					
Норматив на d	Требование нормативных документов исходя из класса ОКС и характера грунтов, на которых он расположен							

Рис. 4. Параметры вертикальных деформаций ОКС

Отметим, что математическая обработка результатов наблюдений должна выполняться с использованием программного обеспечения, строго реализующего метод наименьших квадратов. Выполненная оценка точности определения отметок деформационных марок (m_H) позволит определить значимость вычисленной осадки деформационной марки по следующему статистическому критерию, учитывающему что осадка деформационной марки (ДМ) вычисляется как разность отметок в двух циклах изменений

$$d_i \geq t \cdot \sqrt{2} \cdot m_{H_i} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot m_{H_i}, \quad (1)$$

$$k_{i-j}^{abc} = d_i - d_j, \quad k_{i-j}^{отн} = \frac{d_i - d_j}{S_{i-j}}, \quad b_{i-j}^{abc} = d_z - (d_j - d_i), \quad b_{i-j}^{отн} = \frac{d_z - (d_j - d_i)}{S_{i-j}}, \quad (2)$$

где i, j – номера деформационных марок, образующих грань ОКС;

z – номер деформационной марки, обладающей максимальной осадкой на грани ОКС, определяемой ДМ i, j ; S_{i-j} – длина соответствующей грани.

Отметим, что также, что как и ранее, эти параметры деформаций вычисляются только в том случае, когда для осадок соответствующих ДМ выполняется статистический критерий (1). Кроме того, если грань ОКС образуется только двумя ДМ, выгиб фундамента не вычисляется.

На рис. 5 приведены вертикальные деформации ОКС в форме абсолютных и относительных кренов и выгибов фундамента, полученные для конкретного объекта – многоквартирного жилого дома, имеющего размеры 16 м на 60 м и расположенного на территории г. Новосибирска.

Таким образом, информация, содержащаяся в предлагаемых разделах деформационного паспорта, позволит решать следующие актуальные научно-технические задачи:

– осуществлять необходимую аттестацию зданий и сооружений на предмет их дальнейшей безопасной эксплуатации;

– своевременно разрабатывать и реализовывать профилактические мероприятия, направленные на предотвращение аварийных ситуаций с ОКС, параметры деформаций которых находятся вблизи своих предельно-допустимых значений;

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ОКС № 1								Лист № 1-5
Параметры вертикальных деформаций ОКС								
Абсолютные и относительные крены и выгибы фундамента между циклами I-II								
№ ДМ	Продольные крены				Поперечные крены			
	1-4		5-8		1-8		4-5	
k_{ij}	-3,5	1/14000	-0,7	1/71000	-2,4	1/6700	-1,8	1/8900
b_{ij}	2,4	1/25000	2,5	1/24000	-	-	-	-
Норматив на k и b	Требование нормативных документов исходя из целевого назначения ОКС и характера грунтов, на которых он расположен							
Относительные крены и выгибы фундамента между циклами II-III								
k_{ij}	0,2	1/120000	2,5	1/24000	4,3	1/3700	0,2	1/80000
b_{ij}	2,0	1/30000	2,5	1/24000	-	-	-	-
Норматив на k и b	Требование нормативных документов исходя из целевого назначения ОКС и характера грунтов, на которых он расположен							
Абсолютные крены и выгибы фундамента между циклами I-III								
k_{ij}	5,5	1/11000	3,2	1/19000	6,7	1/2400	2,0	1/8000
b_{ij}	3,2	1/19000	0,3	1/35000	-	-	-	-
Норматив на k и b	Требование нормативных документов исходя из целевого назначения ОКС и характера грунтов, на которых он расположен							

Рис. 5. Абсолютные и относительные крены и выгибы фундамента

– корректировать кадастровую стоимость объектов недвижимости, расположенных в ОКС, для которого определены параметры деформаций на грани своих предельно-допустимых значений;

– приостанавливать или полностью запрещать эксплуатацию зданий и инженерных сооружений по их функциональному назначению при значениях параметров деформаций, превышающих предельно-допустимые значения.

Заключение

Таким образом, полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации:

– для совокупности зданий и инженерных сооружений, расположенных в зонах неблагоприятных физико-геологических процессов и явлений, активной антропогенной, техногенной и сейсмической нагрузки, предложено ввести новый термин – деформационная паспортизация как комплекс организационных и научно-технических мероприятий, направленных на определение фактических пара-

метров деформаций на протяжении всего жизненного цикла существования ОКС и обеспечивающих формирование деформационного паспорта ОКС;

– на примере реального ОКС, расположенного на территории г. Новосибирска, в отношении которого был осуществлен деформационный мониторинг, разработана структура и предложены основные формы деформационного паспорта с соответствующей информацией;

– при выполнении деформационного мониторинга в предположении, что по требованию заказчика работ, необходимо определить только вертикальные деформации, предложен математический алгоритм вычисления значимых осадок, позволяющих определить фактические деформации фундаментов ОКС, сравнить их с предельно-допустимыми значениями и, в случае необходимости, сделать заключение о целесообразности сокращения интервала времени Δt между циклами геодезических измерений и проведения соответствующих профилактических мероприятий для обеспечения безопасной эксплуатации этого сооружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mustafin M. G., Valkov V. A., Kazantsev A. I. (2017). Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. *Procedia Engineering*, Volume 189, P. 729–736. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.115>. (in Eng).
2. Уставич Г. А., Шоломицкий А. А., Васютинский И. Ю., Астапов А. М. Деформационный мониторинг системы «турбоагрегат – фундамент – основание». *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 3. С. 41–52. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-41-52.
3. Аврунев Е. И., Далбараев А. С., Радченко А. В. Геодезическое обеспечение мониторинга объектов недвижимости на примере города Якутска. *Вестник СГУГиТ*. 2024. Т. 29, № 5. С. 5–12. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-5-12.
4. Chai J., Shen S., Ding W., Zhu H., Carter J. Numerical investigation of the failure of a building in Shanghai, China. *Computers and Geotechnics Journal*. 2014. Vol. 55. P. 482–493.
5. Мустафин М. Г. Мониторинг деформационных процессов инженерных и природных объектов. Методические рекомендации для самостоятельного изучения дисциплины. СПб., 2021. 45 с.
6. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Tsirel S. V., Melnikov N. Ya., Bazhukov A. A. Geomechanical substantiation of calculate indentors of the rock mass strength for slopes stability analysis of open pit. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22-26 May 2018)*. London: Taylor and Francis Group. UK. 2018. Vol. 2. P. 1053–1058.
7. Qiang X. Accuracy detection of Satellite and InSAR Technology in the Deformation Monitoring in Civil Engineering. 2020. Vol. 580. P. 012066.
8. Tsakiri M., Lichti D., Pfeifer N. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring. 3rd IAG - 12th FIG Symposium. Baden, 2006. 10 p.

9. Зайцев А. К., Марфенко С. В., Михелев Д. Ш. и др. Геодезические методы исследования деформаций сооружений. М. : Недра. 1991. 272 с.
10. Хорцев В. Л., Проскура Д. В., Гура Д. А., Шевченко Г. Г. Горизонтальные и вертикальные смещения сооружений и причины их возникновения : сборник трудов конференции: Науки о Земле на современном этапе. VI Международная научно-практическая конференция. 2012. С. 116–119.
11. Гура Т. А., Бирюкова А. О., Овсиенко Е. А. Деформации зданий и сооружений и порядок их выявления. Молодой ученый. 2016. № 30 (134). С. 59-62. URL: <https://moluch.ru/archive/134/37529>.
12. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. М. : Стройиздат, 1975. 156 с.
13. Казанцев, А. И. Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений в условиях уплотнительной застройки с учетом оценки зоны влияния строящегося объекта: диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.32. Казанцев Александр Игоревич. СПб. 2016. 117 с.
14. Уставич Г. А. Разработка методов, средств и технологий геодезических измерений при монтаже и эксплуатации оборудования инженерных сооружений в условиях влияния возмущающих воздействий : автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.24.01. Моск. ин-т инж. геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Москва, 1993. 48 с.
15. Нгуен Хыу Вьет. Разработка методики оценки вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов модели деформационной сети : диссертация... кандидата технических наук: 25.00.32/ 2. Нгуен Хыу Вьет. СПб, 2018.171 с.
16. Имансакипова Б. Б. Мониторинговые исследования деформаций инженерных сооружений на основе результатов геодезических наблюдений : диссертация... доктора философии (PhD): 6D071100 Геодезия. Имансакипова Ботакоз Бекетовна. Республика Казахстан, Алматы, 2014. 128 с.

REFERENCES

1. Mustafin M. G., Valkov V. A., Kazantsev A. I. (2017). Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. *Procedia Engineering*. Vol. 189, 729-736. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.115>. (in Eng).
2. Ustavich G. A., Sholomitsky A. A., Vasyutinsky I. Yu., and Astapov A. M. (2025). Deformation Monitoring of the Turbine Unit-Foundation-Subsoil System. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, vol. 30, no. 3, pp. 41-52. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-41-52.
3. Avrunev E. I., Dalbarayev A. S., Radchenko A. V. (2024). Geodetic Support for Monitoring of Real Estate Objects on the Example of the City of Yakutsk *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 29, No. 5. Pp. 5–12. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-5-12.
4. Chai J., Shen S., Ding W., Zhu H., Carter J. (2014). Numerical investigation of the failure of a building in Shanghai, China. *Computers and Geotechnics Journal*. Vol. 55. pp. 482–493.
5. Mustafin M. G. (2021). *Monitoring deformatsionnykh protsessov inzhenernykh i prirodnykh ob"yektov. Metodicheskiye rekomendatsii dlya samostoyatel'nogo izucheniya distsipliny. [Monitoring of Deformation Processes in Engineering and Natural Objects. Methodological Recommendations for Independent Study of the Discipline]*. St. Petersburg. 45 p.
6. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Tsirel S. V., Melnikov N. Ya., Bazhukov A. A. (2018). Geomechanical substantiation of calculate indentors of the rock mass strength for slopes stability analysis of open pit. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22-26 May 2018)*. London: Taylor and Francis Group. UK. Vol. 2. pp. 1053-1058.
7. Qiang X. (2020). Accuracy detection of Satellite and InSAR Technology in the Deformation Monitoring in Civil Engineering. Vol. 580. P. 012066.
8. Tsakiri M., Lichti D., Pfeifer N. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring. *3rd IAG - 12th FIG Symposium*. Baden, 2006. 10 pp.

9. Zaitsev A. K., Marfenko S. V., Mikhelev D. Sh., et al. (1991). *Geodezicheskiye metody issledovaniya deformatsiy sooruzheniy [Geodetic Methods of Researching the Deformation of Structures]*. M.: Nedra. 272 p.: ill.– ISBN ISBN 47-02344-7.

10. Khortsev V. L., Proskura D. V., Gura D. A., Shevchenko G. G. (2012). Horizontal and vertical displacements of structures and the causes of their occurrence. *Sbornik trudov konferentsii: Nauki o Zemle na sovremennom etape. VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. [Proceedings of the conference: Earth Sciences at the present stage. VI International Scientific and Practical Conference]*. pp. 116-119.

11. Gura T. A., Biryukova A. O., and Ovsienko E. A. Deformations of Buildings and Structures and the Procedure for Their Identification. *Molodoy uchenyy. [Young Scientist]*. 2016. No. 30 (134). Pp. 59-62. URL: <https://moluch.ru/archive/134/37529>.

12. Guidelines for the observation of deformations of foundations and foundations of buildings and structures. Moscow, Stroyizdat, 1975. 156 p.

13. Kazantsev, A.I. Geodetic monitoring of deformations of buildings and structures in the conditions of compact development, taking into account the assessment of the zone of influence of the object under construction: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 25.00.32 / Kazantsev Alexander Igorevich. Saint Petersburg. 2016. – 117 p.

14. Ustavich, G.A. Development of methods, tools and technologies of geodetic measurements during installation and operation of equipment for engineering structures under the influence of disturbing influences: abstract of the dissertation.. Doctor of Technical Sciences: 05.24.01. Moscow time. Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography. - Moscow, 1993. 48 p.

15. Nguyen Huy Viet. Development of a methodology for assessing vertical displacements of building and structure foundations based on the analysis of elements of the deformation network model: dissertation... Candidate of Technical Sciences: 25.00.32/ 2. Nguyen Huy Viet.- Saint Petersburg, 2018. 171 p.

16. Imansakipova B. B. Monitoring Studies of Deformations of Engineering Structures Based on the Results of Geodetic Observations: Dissertation... Doctor of Philosophy (PhD): 6D071100 Geodesy. Imansakipova Botakoz Beketovna. Republic of Kazakhstan, Almaty, 2014.- 128 p.

Об авторах

Евгений Ильич Аврунев – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования, советник при ректорате по научной деятельности.

Ильгиз Ахатович Гиниятов – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования.

Артур Ильгизович Гиниятов – кандидат технических наук, доцент кафедры правоведения.

Author details

Evgeniy I. Avrunev – PhD, Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, Administrative Adviser for Research Activities.

Ilgiz A. Giniyatov – PhD, Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning.

Artur I. Giniyatov – PhD, Associate Professor of the Department of Law.

Получено / Received 10.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2026

Принята к публикации / Accepted 09.02.2026

УДК 631.58:528.9

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-115-125>

Мониторинг и оценка возможности появления эрозионных процессов на землях сельскохозяйственного назначения

Л. Т. Бабкенова¹✉, А. В. Дубровский², Н. К. Унышева¹, В. Н. Москвин²

¹ Казахский агротехнический исследовательский университет,
г. Астана, Республика Казахстан

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: Nurlygul_kosherbayevna@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена технология геоинформационного мониторинга деградационных процессов сельскохозяйственных угодий, связанных с эрозией почв. Объектом исследования является Шортандинский район, расположенный в Акмолинской области Республики Казахстан. Исследование состояния сельскохозяйственных земель, учитывая их уникальность и невосполнимость, является важной задачей, имеющей государственное значение. В условиях обширных территорий Казахстана 9 % площади страны занимают пашни, 27 % – сенокосы и пастбища, в связи с этим рациональное использование сельскохозяйственных земель становится критически важным направлением территориального управления. Проведенные исследования основаны на интеграции данных цифровой модели рельефа, дистанционного зондирования Земли, тематических геоинформационных баз данных и физических параметров территории (геология, морфология рельефа, тип почвы, климат). В результате были определены зоны деградации почв, ключевым фактором которой является эрозия. Для оценки эрозионного риска применялись широко используемые в практике землепользования модели USLE (Universal Soil Loss Equation) и RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), с акцентом на фактор противоэрозионных мероприятий (P) в уравнении RUSLE, отражающий эффективность мер по снижению эрозии. На основе полученных данных построена тематическая карта землепользования Шортандинского района. Анализ спутниковых снимков, проведенный в связи с отсутствием данных о проводимых агротехнических мероприятиях, выявил различия в применении противоэрозионных практик: на некоторых участках сельскохозяйственных угодий наблюдались работы по высадке кустарников и обработке почвы против естественного стока, тогда как на других – отсутствие каких-либо защитных мер. Полученные данные сопоставлены с результатами геоинформационного анализа, использующего модели эрозионного риска. В итоге, исследование представляет результаты мониторинга и оценки вероятности возникновения эрозионных процессов, ведущих к ухудшению качества почвы на примере Шортандинского района Республики Казахстан.

Ключевые слова: мониторинг земельных ресурсов, сельскохозяйственные земли, данные дистанционного зондирования Земли, географические информационные системы, геоинформационное моделирование, устойчивое территориальное развитие, модели оценки риска эрозии почвы, противоэрозионные мероприятия

Для цитирования:

Бабкенова Л. Т., Дубровский А. В., Унышева Н. К., Москвин В. Н. Мониторинг и оценка возможности появления эрозионных процессов на землях сельскохозяйственного назначения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 115–125. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-115-125>

Monitoring and assessment of agricultural land erosion risk

L. T. Babkenova^{1✉}, A. V. Dubrovsky², N. K. Unysheva¹, V. N. Moskvina²

¹ Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: Nurlygul_kosherbayevna@mail.ru

Abstract. The article presents a geospatial monitoring technology for degradation processes in agricultural lands driven by soil erosion. The study focuses on Shortandy district in Akmola region, Republic of Kazakhstan. Given the unique and irreplaceable nature of agricultural lands, their condition assessment is of a critical national priority. In Kazakhstan, where arable lands comprise 9 % of the total area and hayfields/pastures 27 %, rational land use is essential for territorial management. The research integrates digital elevation models, remote sensing data, thematic geospatial databases, and physical parameters (geology, relief morphology, soil types, climate). This enabled identification of soil degradation zones, predominantly due to erosion. Erosion risk was quantified using two land management models: USLE (Universal Soil Loss Equation) and RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), with particular emphasis on RUSLE's P factor, which quantifies the efficacy of erosion control practices. A thematic land-use map of Shortandy district was produced based on these data. Satellite imagery analysis revealed heterogeneous erosion control adoption: some plots showed shrub planting and contour plowing aligned against natural runoff, whereas others lacked protective measures. Findings were validated against geospatial erosion risk modeling. The study delineates monitoring and assessment results for erosion-prone processes impairing soil quality, using Shortandy district as a case study.

Keywords: monitoring of land resources, agricultural lands, remote sensing data, geographic information systems, geoinformation modeling, sustainable territorial development, soil erosion risk assessment models, anti-erosion measures

For citation:

Babkenova L. T., Dubrovsky A. V., Unysheva N. K., Moskvina V. N. (2026). Monitoring and assessment of agricultural land erosion risk. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 115–125. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-115-125>

Введение

Мониторинг земельных ресурсов представляет собой критически важную задачу, так как земля является уникальным и невозполнимым ресурсом, особенно для Казахстана с его обширными территориями [1]. В условиях углубляющейся проблемы деградации почв предотвращение появления эрозии, оврагообразования и потери плодородного слоя в результате водной эрозии становится особенно актуальным. Внедрение современных геоинформационных технологий для наблюдения за состоянием земель и происходящими негативными процессами является необходимым шагом к рациональному использованию земельных ресурсов. На сегодняшний день основная проблема заключа-

ется в неэффективном использовании сельскохозяйственных угодий, что требует создания действенной системы контроля состояния земельного фонда и оперативного распознавания появления процессов деградации почвы. Результаты анализа подтверждают необходимость расширения масштабов мониторинговых работ на территории республики для оперативного выявления и решения возникающих проблем, таких как эрозия почвы и потеря плодородного слоя [2].

Использование сельскохозяйственных земель имеет глобальное (сохранение экосистем) и локальное (продовольственная безопасность государства) значение, и управление этими ресурсами должно основываться на эффективном анализе и контроле их состояния, чтобы избежать деградации почв. Инте-

грация данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС) представляет собой мощный инструмент для выявления земель, подверженных эрозии, и позволяет проводить всесторонний анализ состояния территорий [3–5].

Эффективное применение геоинформационного мониторинга поможет не только выявить, но и помочь предотвратить почвенную эрозию и оврагообразование. Планирование почвозащитных мероприятий средствами ГИС существенно повышает устойчивость сельскохозяйственных угодий к прогрессирующему эрозионным процессам, обеспечивая сохранение плодородного слоя. Настоящее исследование направлено на апробацию технологии геоинформационного анализа эрозионных процессов, для формирования и реализации мер по сохранению земельных ресурсов и усовершенствованию системы мониторинга эрозии сельскохозяйственных земель в Казахстане, способствуя устойчивому развитию территорий и охране окружающей среды.

Методы и материалы

Объектом исследования являются земельные ресурсы Шортандинского района Акмолинской области [6]. В ходе исследования были использованы методы сравнительного анализа, сопоставления, теоретического обобщения и моделирования. Проведен обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных современным подходам к разработке и применению цифровых моделей. Было рассмотрено несколько моделей для оценки риска эрозии почвы, среди которых наиболее широко применяются универсальная модель потерь почвы (USLE) [7, 8] и её усовершенствованная версия (RUSLE) [9–12]. Цифровая модель рельефа (ЦМР) была создана на основе спутниковых снимков, полученных в ходе миссии SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [13, 14].

При проведении исследований применена геоинформационная система ArcGIS и модуль ModelBuilder [15].

Результаты

Проблема эрозии почв и её связей с атмосферными осадками становится все более ак-

туальной в условиях изменений климата и антропогенной нагрузки на экосистемы. В данном исследовании применен метод кригинга для интерполяции данных о количестве атмосферных осадков, что позволило выявить закономерности в распределении осадков. Результаты интерполяции, на основе данных о количестве атмосферных осадков, были дополнены ежемесячным компонентом переменных данных CRU TS версии 4.08 в частности, показателями PRE (атмосферные осадки) [16–18]. На основе этих данных был рассчитан среднемесячный R-фактор, характеризующий эрозионную активность, для каждой станции наблюдения. В рамках исследования также были получены двенадцать глобальных ежемесячных карт [19–20], отражающих пространственное распределение эрозионной активности за десятилетний период с 2013 по 2023 г. Каждая карта включает 120 временных каналов, многовременные данные, полученные в разные временные точки, для мониторинга изменений на поверхности Земли. Такие данные позволяют анализировать динамику различных процессов, включая эрозию почв, что позволяет провести детальный анализ динамики эрозионных процессов в глобальном масштабе. Согласно представленным данным, среднегодовое количество осадков в районе Шортанды колеблется от 300,4 до 331,2 мм, причем наибольшие значения зафиксированы в восточной части региона. На основе анализа годовых данных была составлена карта эрозионной активности, которая показывает, что значения R-фактора варьируются от 27 до 63 МДж мм га⁻¹ год⁻¹ (рис. 1).



Рис. 1. Распределение эрозионной силы осадков

Наиболее высокие показатели отмечаются в восточной части области, тогда как в запад-

ных и юго-западных районах наблюдается постепенное снижение потенциала осадков для развития эрозии почв [16].

Типы почв Шортандинского района отражают разнообразие почвенного покрова региона, обусловленное климатическими, геоморфологическими и гидрологическими факторами. Преобладание черноземов и каштановых почв подчеркивает значительный сельскохозяйственный потенциал области [16].

Фактор эродированности почвы K учитывает такие свойства почвы, как гранулометрический состав, содержание органического вещества, структуру и водопроницаемость (табл. 1) [9–11].

Для расчёта фактора K используется следующая формула:

$$K = fcsand * fclsil * forgC * fhisand ,$$

где $fcsand$ – фактор, который представляет эродированность почвы с высоким содержанием крупного песка и высокие значения для почв с небольшим содержанием песка;

$fclsil$ – фактор, который отражает эродированность для почв с высоким соотношением глины и ила;

$forgC$ – фактор, который снижает эродированность почвы с высоким содержанием органического углерода;

$fhisand$ – фактор, который показывает эродированность для почв с высоким содержанием песка.

Таблица 1. Расчет коэффициента K

Обозначение единицы почвы	Процент песка в верхнем слое почвы	Процент ила в верхнем слое почвы	Процент глины в верхнем слое почвы	Процент органического углерода (OC) в верхнем слое почвы	$fcsand$	$fclsil$	$forgC$	$fhisand$	K
СК	41,6	26,6	31,8	1,32	0,200	0,790	0,84	0,999	0,133
КН	54,5	27,3	18,2	2,16	0,200	0,858	0,75	0,998	0,129

Принятые обозначения – СК (Calcic Chernozems) – кальциевые черноземы; КН (Kastanozems) – нормальные каштановые почвы.

Распределение коэффициента эрозии почвы на примере Шортандинского района Акмолинской области показано на рис. 2.



Рис. 2. Распределение коэффициента эрозии почвы

Длина и уклон каждого сегмента измеряются, а LS -фактор для каждого сегмента вычисляется с использованием метода RUSLE.

Известно, что LS -фактор варьируется по всей территории в зависимости от существующих факторов C (фактор управления растительным покровом) и P (фактор противоэрозионных мероприятий), но, как правило, чем круче уклоны и объем склонового потока, тем выше LS -фактор. Процент уклона колеблется от 0 до 109 % в исследуемой области (рис. 3), где стандартное отклонение LS достигло высокого значения в некоторых местах, что указывает на значительную разницу в рельефе местности.

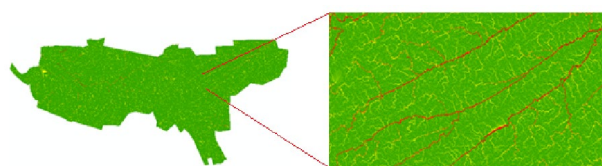


Рис. 3. Цифровая модель фактора длины-уклона (LS) Шортандинского района

C-фактор отражает положительное влияние растительного покрова на устойчивость почвенных частиц, что способствует снижению эрозии. Это связано с тем, что растительность поглощает кинетическую энергию дождевых капель и уменьшает поверхностный сток. В связи с этим для каждого типа земельного покрова можно определить соответствующее значение C [17]. Однако, например, выращивание зерновых культур может приводить к снижению биомассы и урожайности из-за вымывания питательных веществ, необходимых для роста растений, а также образования борозд на поверхности почвы.

Данные о видах землепользования помогают глубже изучить особенности земель и их состояние, включая структуру посевов, лесные массивы, водные объекты. Эти сведения имеют ключевое значение для планирования мероприятий по предотвращению или снижению эрозии почвы. Современные технологии, такие как дистанционное зондирование и ГИС, позволяют создавать тематические карты землепользования и земельного покрова для конкретных регионов [18].

На исследуемой территории выделено 7 участков, соответствующих различным классам землепользования (рис. 4).

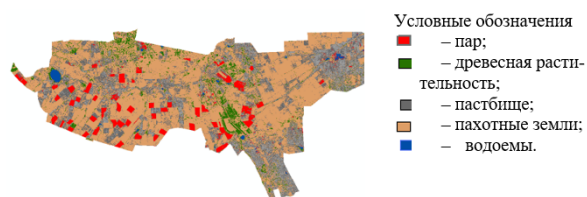


Рис. 4. Виды землепользования на территории Шортандинского района

Фактор управления культурой землепользования (C-фактор) варьируется в зависимости от типа землепользования и принимает значения от 0 (полная защита от эрозии, например, густой лес) до 1 (полное отсутствие защиты, например, почва без защитного покрова), в исследуемом объекте среднее значение фактора – 0,43 (рис. 5). На основе карты землепользования и значений C-фактора построена тематическая карта видов землепользования.

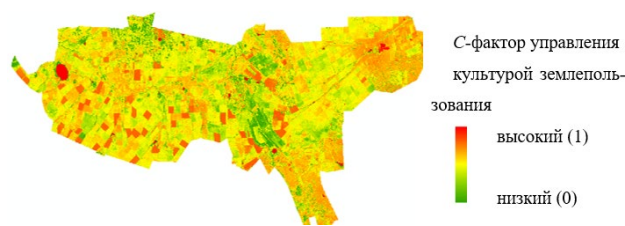


Рис. 5. C-фактор Шортандинского района

Фактор противоэрозионных мероприятий (P) в универсальном уравнении потерь почвы (RUSLE) отражает эффективность применяемых мер по снижению эрозии. Он определяется как отношение величины потери почвы на участке с конкретными противоэрозионными практиками к потере почвы при обработке вдоль склона без таких мероприятий. Значение фактора (P) варьируется от 0 до 1:

$P = 1$: отсутствие противоэрозионных мероприятий;

$P < 1$: наличие эффективных мер, снижающих эрозию.

Таким образом, фактор P учитывает влияние противоэрозионных мероприятий на снижение потерь почвы, позволяя оценить их эффективность в конкретных условиях [16].

В связи с отсутствием информации о проведении агротехнических мероприятий на территории сельскохозяйственных полей Акмолинской области, в процессе дешифровки спутниковых снимков Ladsant 8 от 11.07.2023 было выявлено, что на отдельных участках осуществлялись работы по высадке кустарников и обработке пахотных земель в направлении, противоположном естественным почвенным потокам. В то же время на других участках не было зафиксировано проведение мероприятий, направленных на защиту почвенного покрова (рис. 6).



Рис. 6. Спутниковые снимки Ladsant 8 полей с признаками проведения противоэрозионных мероприятий

Значение P принято равным 0,5 для всей исследуемой территории, что обусловлено отсутствием мероприятий по борьбе с эрозией. Не все фермеры используют методы противозерозионной обработки почвы и контурной вспашки, что приводит к появлению процессов деградации почвы. На основании проведенных исследований установлено, что интенсивность потери плодородия почв на территории изучаемого района соответствует среднему уровню и составляет 2,1 тонны на гектар в год. Анализ данных показал, что в пределах исследуемого объекта порядка 81,36 % площади характеризуются низкими или умеренными темпами потери плодородия, варьирующимися в диапазоне от 0 до 20 т га год. При этом на отдельных участках зафиксированы критические показатели потери плодородия, достигающие 18,64 % от общей площади, где потери плодородного слоя почвы составляют до 40 т га год.

Тематическая карта распределения фактора A – потери почвы на единицу площади в год ($t\ га^{-1}год^{-1}$). Для пространственной оценки эрозионной опасности была выполнена классификация территории по коэффициенту потерь почвы (фактор A) на единицу площади в год. Расчёты выполнены на основе цифровой модели рельефа, данных уклона и факторов растительности (NDVI). В результате была построена карта эрозионных участков, позволяющая наглядно представить распределение степеней эрозионного воздействия и выделить территории с критическим уровнем потерь почвы (свыше 20 т/га·год). На рис. 7 представлена классификация участков по значениям коэффициента A .



Рис. 7. Эрозионные участки по коэффициенту фактора A

Для количественной оценки состояния сельскохозяйственных угодий была прове-

дена классификация по уровням потерь почвы в результате эрозионных процессов. Расчёт осуществлялся на основе пространственного анализа коэффициента потерь (фактора A), определяющего массу смытого почвенного слоя с единицы площади за год. Это позволяет выявить долю территорий, подверженных различной степени эрозии, и оценить масштабы потенциальных потерь почвенного ресурса.

В табл. 2 представлено распределение сельскохозяйственных угодий по категориям эрозионной опасности, выраженное в процентах и площади ($км^2$).

Таблица 2. Распределение площадей сельскохозяйственных угодий по степени эрозионной опасности и уровням потерь почвы

ПП	Площадь, км	Потери почвы на единицу площади в год, т / га	%
1	2452,2	0-5	55,49
2	1143,71	5-20	25,87
3	823,64	20-40	18,64
Всего	4419,55		100

Анализ данных по эрозионной опасности на территории сельскохозяйственных угодий показал неоднородное распределение потерь почвы в зависимости от условий рельефа и состояния земель. Согласно классификации, наибольшая часть площади — 55,49 % ($2\ 452,2\ км^2$) — характеризуется минимальными потерями почвы, не превышающими 5 т/га в год, что указывает на относительную устойчивость этих участков к эрозионным процессам.

Участки с умеренным уровнем потерь (5–20 т/га) занимают $1\ 143,71\ км^2$, что составляет 25,87 % общей площади. Эти территории требуют внедрения профилактических агротехнических мероприятий, таких как контурная обработка почвы, минимизация механического воздействия и восстановление растительного покрова.

Наиболее подверженными эрозии оказались поля с потерями от 20 до 40 т/га, которые составляют $823,64\ км^2$ или 18,64 % от общей площади. Для этих земель необходимы первоочередные противозерозионные меры, включая организацию буферных полос, посадку многолетних трав и временный вывод из активного сельскохозяйственного оборота.

Таким образом, полученные результаты позволяют выделить приоритетные участки для охранных мероприятий и включить оценку эрозионной опасности в систему планирования землепользования.

Полученные значения фактора потери почвы свидетельствуют о наличии локальных зон с интенсивным процессом эрозии, требующих принятия дополнительных мер по сохранению почвенного покрова. Агрозащитные мероприятия могут включать: контурную вспашку, создание террас, посадку лесополос и защитных насаждений, мульчирование, создание водосборных канав и дренажных систем, применение севооборота, сохранение растительного покрова, использование эрозионно-устойчивых культур. Важно повысить осведомленность фермеров о методах устойчивого земледелия, что обеспечит более эффективное использование земельных ресурсов и позволит предотвратить дальнейшую деградацию почв. Следует также учитывать долгосрочные тенденции изменений эрозионных процессов, которые являются результатом взаимодействия различных факторов, включая климатические изменения, человеческую деятельность, динамику ландшафтов и экосистем и др. Эти факторы направлены как на усиление, так и на снижение эрозионных рисков. Например, процессы, связанные с глобальным потеплением, вызывают изменение количества осадков и поверхностного стока. Процессы урбанизации также ведут к уплотнению почвы, уменьшению естественного растительного покрова и, как следствие, усилению эрозионных процессов. Важно учитывать многообразие факторов при планировании использования земельных ресурсов и разработки стратегий борьбы с эрозией. Применение комплексного подхода, включающего защиту экосистем и адаптацию к изменению климата, может значительно смягчить негативные последствия эрозионных процессов.

Обсуждение

Результаты мониторинговых исследований сельскохозяйственных территорий используются для разработки комплекса противоэрозионных мероприятий и рекомендаций. Данный

подход согласуется с концепциями землепользования, направленными на формирование экологически устойчивых агроландшафтов [21]. Предлагаемые в статье модели для оценки риска эрозии почвы могут быть использованы в качестве инструмента цифрового моделирования эрозионных свойств агроландшафтов.

Одним из ключевых преимуществ, рассмотренных в статье моделей для оценки риска эрозии почвы, является их гибкость, выражающаяся в возможности расширения набора входных параметров, например, как предлагается в работе [22], это могут быть уровень засоления, кислотность, влажность, плотность почвы. Расширение параметров допустимо при условии научного обоснования влияния каждого дополнительного фактора на исследуемый процесс. Такой подход позволяет учитывать большее количество переменных, что повышает детализацию и достоверность анализа. Кроме того, модели поддерживают обработку значительных объемов статистических данных, что особенно важно при работе с крупномасштабными проектами или исследованиями, требующими высокой точности, а также разработки комплекса агротехнических мероприятий.

Как отмечается в работе [23], «для внедрения почвозащитного посменного сеяния сельскохозяйственных культур требуется эрозионно-почвенная карта». Картографо-математическое моделирование позволяет определить оптимальные места для размещения различных сельскохозяйственных культур в рамках почвозащитного севооборота. Предложенный подход к севообороту учитывает особенности почвенного покрова и минимизирует риск эрозии. Дальнейшая работа предполагает уточнение границ зон эрозии и разработку детальных рекомендаций по выбору культур для каждой зоны. Это позволит повысить эффективность почвозащитных мероприятий и увеличить урожайность сельскохозяйственных культур. Полученные результаты могут быть использованы для планирования землепользования в аналогичных регионах с подобными почвенными условиями.

Вместе с тем, ряд авторов поддерживают рассмотренные в статье подходы к построению моделей эрозионных процессов и предлагают

их дальнейшее использование в экономических моделях прогнозирования риска возникновения эрозии на основании «подсчета суммы эколого-экономических потерь, возникших в результате эрозии почвы» [24]. Такой подход позволяет количественно оценить экономический ущерб от эрозии и обосновать необходимость принятия мер по её предотвращению.

Сравнение полученных данных с работами, проводимыми в других регионах, показывает большую сходимость результатов при комплексном учете факторов эродированности почвы. Примером могут служить работы по исследованию агрогенной деградации почв и почвенного покрова Красноярской лесостепи [25]. В работе [26] отмечается, что «при переходе на контурно-ландшафтное земледелие повышаются плодородие склоновых земель», данная технология апробирована на сельскохозяйственных землях степной зоны южного Урала, а также при организации систем адаптивно-ландшафтного земледелия Ростовской области [27].

Дальнейшие исследования эрозионных процессов должны быть направлены на повышение точности моделей и учет региональных особенностей сельскохозяйственных земель. Комплексный подход, включающий как экологические, так и экономические аспекты, позволит эффективно управлять рисками возникновения эрозии почв.

Заключение

В проведенном исследовании выполнены мониторинг и оценка возможности появления

эрозионных процессов, ведущих к потере качества почвы. Инструмент ModelBuilder предоставил возможность выполнения эффективного и удобного анализа и классификации сельскохозяйственных территорий. Данный инструмент обеспечивает детальное исследование земельных участков, определение их ключевых характеристик и последующую категоризацию в соответствии с заданными критериями. В рамках проведенных исследований была разработана база геоданных «Классификация сельскохозяйственных земель», содержащая наборы классов пространственных объектов, включая растровые каталоги «Цифровая модель рельефа», «Grid-модели» и «Буферные зоны».

Применение данного программного решения позволяет пользователю оперативно получать точные данные о состоянии сельскохозяйственных угодий, что способствует повышению обоснованности принимаемых решений в сфере планирования и управления земельными ресурсами.

Современные технические средства и геотехнологии предоставляют возможность автоматизации аналитических процессов, что существенно ускоряет получение оценочных данных и минимизирует вероятность возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором. Это достигается за счет использования алгоритмов, способных обрабатывать большие объемы информации с высокой точностью и воспроизводимостью результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сводный аналитический отчет о состоянии и использовании земель. Республики Казахстан. Комитет по управлению земельными ресурсами Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан, Астана, 2024. С. 318.
2. Бабкенова Л. Т. Статистический анализ использования земель сельскохозяйственного назначения. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью». Новосибирск : СГУГиТ, 2022. С. 56–62.
3. Оюунханд Бямба, Касьянова Е. Л. Картография и геоинформатика // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 5. С. 119–125. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-5-119-125.
4. Китаева М. А., Дробинина Е. В. Автоматизация обработки цифровой модели рельефа при решении задач хозяйственного освоения закарстованных территорий. Геоинформатика. 2023. № 4. С. 4–14. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-4-4-14

5. Дубровский А. В. Методологическое и теоретическое обоснование принципов эффективного использования земельных ресурсов на основе геоинформационных технологий : автореферат дис. ... д-ра техн. наук. 2024. С. 17.
6. Акмолинская область [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> дата обращения: 21.02.2025.
7. Zhou W., Wu B. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: A case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *Int. J. Sediment Res.* 2008. Art. 23. P. 167–173. <https://doi.org/10.1002/ldr.1083>.
8. Ebron J.G., Lim T.A. "Siltation Modeling in Laguna Lake: A Case Study of Brgy. Palingon, Calamba City. International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE). 2024. P.1–6. DOI: 10.1109/ICTKE62841.2024.10787196.
9. Yuan S., Xu Q., Zhao K., Zhou Q., Wang X., Zhang X., Chen W., Ji X. Dynamic analyses of soil erosion and improved potential combining topography and socio-economic factors on the Loess Plateau. *Ecol. Indic.* 2024. Art.60 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111814>.
10. Andrew K. Marondedze and Brigitta S. Assessment of Soil Erosion Using the RUSLE Model for the Epworth District of the Harare Metropolitan Province, Zimbabwe. *Sustainability.* 2020. Art 12(20), 8531. <https://doi.org/10.3390/su12208531>.
11. Shamshad, A., Azhari, M.N., Isa M.H., Hussin W.M.A.W.; Parida B.P. Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. *Catena.* 2007. Art. 72. P. 423–432. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.08.002>.
12. Hamza I., Rachid M., Bouamar B., Rachid M., Ahmed D., Derradji A. Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province –Northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research* 2016. Art. 4. P. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.07.001>.
13. FAO Soils Portal [Электронный ресурс]. URL <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/> дата обращения: 21.02.2025.
14. Kobrick M., Crippen R. SRTMGL1 v003. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Электронный ресурс]. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/> дата обращения: 21.02.2025.
15. Курлович Д. М. Использование Model Builder при разработке набора инструментов «Структурно-геоморфологический ГИС анализ» для ArcToolbox ГИС ArcGIS 9.3. Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии : материалы международного научного конгресса 2011. Ч. 2. С. 193–198.
16. FAO soils portal, FAO/UNESCO Soil Map of the World. URL <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/>
17. Samira B., Kamila B. H., Abderrazak B., Abdeldjalil B. Identification of zones at risk of erosion by the combination of a digital model and the method of multi-criteria analysis in the arid regions: case of the Bechar Wadi watershed. *Applied Water Science.* 2020. Art.121. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01191-6>.
18. Ganasri B. P. and Ramesh H. Assessment of Soil Erosion by RUSLE Model Using Remote Sensing and GIS—A Case Study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 2016. Art. 7. P. 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>.
19. Datasets Climatic Research Unit (CRU), [Электронный ресурс]. URL <https://www.climateurope.eu/datasets-climatic-research-unit-cru/>. дата обращения: 21.02.2025.
20. Joint research centre, Global Rainfall Erosivity, Climate Research Unit . [Электронный ресурс]. дата обращения: 21.02.2025.
21. Рыбалкин Б. А. К вопросу о создании экологически устойчивых агроландшафтов Воронежской области. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета.* 2018. № 3. С. 40–44.
22. Федотова А. В., Яковлева Л. В., Сорокин А. П. Оценка состояния деградированных почв ландшафтов дельты Волги. *Естественные науки.* 2013. № 1(42). С. 28–36.
23. Акперова У. З. Эрозия почвы водой и меры борьбы с ней. *Евразийский союз ученых.* 2020. № 8–5(77). С. 45–51. DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.5.77.986.
24. Чикалова Л. С. Эрозия почвы как фактор, оказывающий влияние на урожайность продукции сельского хозяйства. *Экология и строительство.* 2023. № 3. С. 13–20. DOI 10.35688/2413-8452-2023-03-002.

25. Шпедт А. А., Трубников Ю. Н., Жаринова Н. Ю. Агрогенная деградация почв и почвенного покрова Красноярской лесостепи. Почвоведение. 2017. № 10. С. 1253–1261. DOI 10.7868/S0032180X17100124.
26. Скороходов В. Ю., Максюттов Н. А., Зоров А. А. Сохранение плодородия и защита почвы от эрозии в степной зоне Южного Урала. Плодородие. 2021. № 6(123). С. 22–25. DOI 10.25680/S19948603.2021.123.06.
27. Мищенко А. Е., Гаевая Э. А., Кисс Н. Н., Тарадин С. А. Защита почв от деградации в адаптивно-ландшафтном земледелии Ростовской области. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. № 3(53). С. 11–14.

REFERENCES

1. *Svodnyj analiticheskij otchet o sostoyanii i ispol'zovanii zemel'. Respubliki Ka-zahstan. Komitet po upravleniyu zemel'nymi resursami Ministerstva sel'skogo hozyajstva Respubliki Kazahstan, Astana, 2024. С. 318. [in Russian].*
2. Babkenova L.T. (2022). Statisticheskij analiz ispol'zovaniya zemel' sel'skohozyaj-stvennogo naznacheniya. *Interekspos Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]* Vol. 3. P. 56–62. [in Russian].
3. Oyuunhand B., Elena L. K. (2021). Kartografiya i geoinformatika. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]* T.26, № 5. С. 119–125. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-5-119-125. [in Russian].
4. Kitaeva M. A., Drobinina E. V. (2023). Avtomatizaciya obrabotki cifrovoj modeli rel'efa pri reshenii zadach hozyajstvennogo osvoeniya zakarstovannyh territorij. *Geoinformatika [Geoinformatika]* №4.- P. 4–14. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-4-4-14. [in Russian].
5. Dubrovskij A. V. (2024). Metodologicheskoe i teoreticheskoe obosnovanie principov effektivnogo ispol'zovaniya zemel'nyh resursov na osnove geoinformacionnyh tekhnologij. Avtoreferat. P. 17. [in Russian].
6. Akmolinskaya oblast' [Elektronnyj resurs] Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/data obrashche-niya: 21.02.2025](https://ru.wikipedia.org/wiki/data_obrashcheniya:21.02.2025).
7. Zhou W., Wu B. (2008). Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: A case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *Int. J // Sediment Res*, Art. 23. P.167–173. <https://doi.org/10.1002/ldr.1083>
8. Ebron J. G., Lim T. A. (2024) Siltation Modeling in Laguna Lake: A Case Study of Brgy. Palingon, Calamba City. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICTKE62841.2024.10787196.
9. Yuan S., Xu Q., Zhao K., Zhou Q., Wang X., Zhang X., Chen W., Ji X. (2024). Dynamic analyses of soil erosion and improved potential combining topography and socio-economic factors on the Loess Plateau. *Ecol. Indic.* Art.60 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111814>
10. Andrew K. Maronedze and Brigitta S. (2020). Assessment of Soil Erosion Using the RUSLE Model for the Epworth District of the Harare Metropolitan Province, Zimbabwe. *Sustainability*. Art 12(20), 8531. <https://doi.org/10.3390/su12208531>
11. Shamshad, A., Azhari, M. N., Isa M. H., Hussin W. M. A. W.; Parida B. P. (2007). Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. *Catena*. Art.72. P.423–432. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.08.002>.
12. Hamza I., Rachid M., Bouamar B., Rachid M., Ahmed D., Derradji A. (2016). Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province –Northern Morocco // *International Soil and Water Conservation Research* Art. 4. P. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.07.001>.
13. FAO Soils Portal. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/>. data obrashcheniya: 21.02.2025.
14. Kobrick M., Crippen R. SRTMGL1 v003. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second. Retrieved from <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmg1v003/> data obrashcheniya: 21.02.2025.
15. Kurlovich D. M. (2011). Ispol'zovanie Model Builder pri razrabotke nabora instrumentov «Strukturno-geomorfologicheskij GISanaliz» dlya ArcToolbox GIS ArcGIS 9.3. *Mezhdunarodnyj kongress po informatike: informacionnye sistemy i tekhnologii: Materialy mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa [International Congress on Informatics: Information Systems and Technologies: Proceedings of the International Scientific Congress]* Vol. 2. С. 193–198. [in Russian].

16. FAO soils portal, FAO/UNESCO Soil Map of the World. Retrieved from <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/>
17. Samira B., Kamila B. H., Abderrazak B., Abdeldjalil B. (2020). Identification of zones at risk of erosion by the combination of a digital model and the method of multi-criteria analysis in the arid regions: case of the Bechar Wadi watershed. *Applied Water Science*. Art.121. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01191-6>
18. Ganasri, B.P. and Ramesh, H. (2016). Assessment of Soil Erosion by RUSLE Model Using Remote Sensing and GIS—A Case Study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, Art.7. P. 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
19. Datasets Climatic Research Unit (CRU), Retrieved from <https://www.climate-europe.eu/datasets-climatic-research-unit-cru/> data obrashcheniya: 21.02.2025.
20. JOINT RESEARCH CENTRE, Global Rainfall Erosivity, Climate Research Unit data obrashche-niya: 21.02.2025.
21. Rybalkin, B. A. (2018). On the issue of creating ecologically sustainable agricultural landscapes in the Voronezh region. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Michurinsk State Agrarian University]*, 3, 40–44 [in Russian].
22. Fedotova, A. V., Jakovleva, L. V., Sorokin, A. P. (2013). Assessment of the state of degraded soils of the Volga Delta landscapes. *Estestvennye nauki [Natural Sciences]*, 1(42), 28-36 [in Russian].
23. Akperova, U. Z. (2020). Soil erosion by water and measures to combat it. *Evrazijskij sojuz uchenyh [The Eurasian Union of Scientists]*, 8–5(77), 45–51 [in Russian].
24. Chikalova, L. S. (2023). Soil erosion as a factor affecting the yield of agricultural products. *Jekologija i stroitel'stvo [Ecology and Construction]*, 3, 13–20 [in Russian].
25. Shpedt, A. A. (2017). Agroгенic degradation of soils and soil cover of the Krasnoyarsk forest-steppe. *Pochvovedenie [Soil Science]*, 10, 1253–1261 [in Russian].
26. Skorohodov, V. Ju., Maksjutov, N. A., Zorov, A. A. (2021). Preservation of fertility and soil protection from erosion in the steppe zone of the Southern Urals. *Plodorodie [Fertility]*, 6(123), 22–25 [in Russian].
27. Mishhenko, A. E., Gaevaja, Je. A., Kiss, N. N., Taradin, S. A. (2015). Protection of soils from degradation in adaptive landscape agriculture in the Rostov region. *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]*, 3(53), 11–14 [in Russian].

Об авторах

Лаззат Темерхановна Бабкенова – аспирант, преподаватель кафедры геодезии.

Алексей Викторович Дубровский – доктор технических наук, профессор, директор Института кадастра и природопользования.

Нурлыгуль Кошербаевна Уньшева – магистр наук, докторант кафедры землеустройства.

Виктор Николаевич Москвин – доктор технических наук, профессор кафедры кадастра и территориального планирования.

Author details

Lazzat T. Babenkova – PhD student, Lecturer, Department of Geodesy

Alexey V. Dubrovsky – D.Sc, Professor, Director of the Institute of Cadastre and Natural Resources Management.

Nurlygul K. Unysheva – MSc, PhD student, Department of Land Management

Victor N. Moskvina – D.Sc, Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning.

Получено / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.05.2025

Принята к публикации / Accepted 14.08.2025

УДК 332.3

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-126-136>

Оценка пространственного развития земель городской агломерации

О. В. Богданова¹, К. Р. Меркурьева¹✉

¹ Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация
e-mail: k_r_merkurieva@mail.ru

Аннотация. За последнее время в ряде крупных российских городов наблюдается значительный рост агломераций, что вызывает большой научный и практический интерес относительно исследования территорий и оценки их развития. В связи с этим возникает необходимость разработки методики оценки пространственного развития земель городских агломераций на основе территориального базиса, позволяющая оценить реальную картину развития современных городских агломераций. Для решения поставленной задачи авторы предлагают авторскую методику оценки пространственного развития земель городской агломерации. В основе оценки используется перечень отобранных репрезентативных показателей, сформированный с учетом уточненных критериев оценки при применении метода корреляционного анализа. Разработанная методика по оценке уровня пространственного развития земель городской агломерации позволяет оценить земли городских округов и территории, приоритетные для развития, являющиеся единой материальной и социальной средой, с целью учета структурной неоднородности дифференцированного внутреннего пространства городской агломерации и определения внутренних локальных территорий для рационального распределения ограниченных ресурсов между ними. Полученные результаты оценки пространственного развития территории способствуют более эффективной разработке стратегических и программных документов развития муниципальных образований. На основе сформулированной авторами методики предполагается разработка программного модуля оценки пространственного развития земель городской агломерации на базе программного обеспечения QGIS, обеспечивающего с учетом автоматизированной обработки процессов анализа и расчета интегрального индекса зонирование территории городской агломерации с предоставлением данных по оценке уровня пространственного развития всей исследуемой территории, а также отдельных территориальных единиц в составе агломерации. Предложенная методика опробована на землях Тюменской городской агломерации, имеющей на сегодняшний день статус развивающейся агломерации первого порядка.

Ключевые слова: земли Тюменской городской агломерации, территориальные показатели, методика оценки пространственного развития, опробование, программный модуль QGIS

Для цитирования:

Богданова О. В., Меркурьева К. Р. Оценка пространственного развития земель городской агломерации. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 126–136. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-126-136>

Assessment of Urban Agglomeration Spatial Development

O. V. Bogdanova¹, K. R. Merkurieva¹✉

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

e-mail: k_r_merkurieva@mail.ru

Abstract. In recent years, several major Russian cities have witnessed substantial growth in their urban agglomerations, generating significant scientific and practical interest in the study and evalua-

tion of these territories. This trend underscores the need for a methodology to assess the spatial development of urban agglomeration, grounded in a territorial framework that provides a realistic portrayal of contemporary urban agglomerations. To address this challenge, the authors propose a methodology for assessing the spatial development of urban agglomeration. The assessment is based on a curated set of representative indicators, refined through assessment criteria and correlation analysis. The methodology facilitates the evaluation of urban district lands and priority development areas, which constitute a unified material and social environment, while accounting for structural heterogeneity within the differentiated internal space of the urban agglomeration. It also enables the identification of local territories for the rational allocation of limited resources. The resulting spatial development assessments support more effective formulation of strategic and programmatic documents for municipal entities. Based on this methodology, the authors intend to develop a QGIS-based software module that automates data processing, analysis, and integral index computation. This tool will generate zoning maps of the agglomeration territory, along with assessment of spatial development levels for both the overall study area and its constituent territorial units. The proposed methodology has been validated on the lands of the Tyumen urban agglomeration, which holds first-order developing status.

Keywords: lands of the Tyumen urban agglomeration, territorial indicators, methodology for assessing spatial development, QGIS software module

For citation:

Bogdanova O. V., Merkurieva K. R. (2026). Assessment of Urban Agglomeration Spatial Development. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 126–136. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-126-136>

Введение

В настоящее время на решение вопросов, связанных с пространственным развитием территорий, обращено значительное внимание. Исследования в области пространственного развития доказывают необходимость осуществления трансформации территорий в части преобразования территориальной среды, а также совершенствования нормативно-правового регулирования пространственного развития, поскольку осуществление любой жизнедеятельности влияет на аспекты пространственного развития земель, его дифференциации по отношению к различным территориям внутри региона. Таким образом, устранение несоответствий в уровне развития территорий, расположенных в центральной части и на окраинах, является одним из приоритетных направлений для достижения целей пространственного развития, путем формирования городских агломераций, являющихся формами высококонцентрированного расселения групп населения [1].

Такая форма организации территории, как агломерация, попадет под особое внимание

в связи с широким распространением вопросов пространственного развития территорий, в том числе в масштабах государств. Процесс агломерирования способствует компактной организации пространства территории субъекта или страны в целом, образуя комплексную систему, которая, в свою очередь, создает условия для укрепления расселения населения на территории [2]. Согласно Указу Президента РФ от 16.01.2017 № 13 «Об утверждении Основ государственной политики регионального развития Российской Федерации на период до 2025 г.», государственная политика определяет своей целью структурирование и организацию с возможностью регулирования внутренней и внешней миграции, используя механизмы развития территорий крупнейших городских агломераций. Развитые крупнейшие городские агломерации обладают высокой конкурентоспособностью, в том числе и на мировой арене, и создают в своем арсенале благоприятные условия с целью привлечения высококвалифицированных трудовых ресурсов.

Таким образом, следует сделать вывод об эффективности процесса агломерирования,

выступающего в роли весомого стратегического инструмента, позволяющего формировать новые точки роста для успешного пространственного развития, организовывать экономически связанные и инфраструктурно развитые территориальные единицы. Кроме того, актуальность и практическую значимость в развитии агломерации как инструмента пространственного развития подтверждает реализация национального проекта «Стратегия агрессивного развития инфраструктуры», в котором используется комплексный подход к пространственному развитию, предполагающий развитие агломераций, опорных населенных пунктов и геостратегических регионов, в результате чего формируется единая среда геопространственные данные и соответствующая информационная система, содержащая множество информационных слоев [3]. Важно отметить, что в число приоритетных агломераций первого порядка (27 агломераций) входит и Тюменская агломерация. Таким образом, объектом в рамках данного исследования выступают земли Тюменской городской агломерации.

Методы и методология исследования

В настоящий момент в нашей стране не сформировано единого общепринятого подхода по оценке уровня пространственного развития земель городских агломераций. Вопросы пространственного развития территории рассматриваются в работах следующих исследователей: особенности влияния определенных факторов на пространственное развитие территории отражены в трудах А. П. Карпик [4, 5], А. П. Сизова и Е. Г. Черных [6, 7]; В. Л. Глазычев [8], В. Н. Лексин [9], Г. М. Лаппо [10, 11], Н. Р. Камынина [12], Н. В. Зубаревич [13] в своих работах анализируют проблемы и предлагают их решения в области городского и агломерационного развития. Исследование вопроса пространственного развития земель рассмотрено в работе Н. И. Бурмакиной, А. В. Илюшина, Т. В. Илюшиной, Е. А. Карфидовой, Т. К. Колевид, А. Ф. Кораблина, З. С. Косарукова, А. А. Кузяковой,

О. В. Миклашевской, М. С. Чуприна, А. В. Пересветовой, Т. Ф. Пушкиной, А. П. Сизова [14]. Вопросами оценки развития городских агломераций занимались следующие отечественные и зарубежные исследователи: Ю. А. Аникина [15], И. В. Волчкова и Н. Н. Минаев [16], П. М. Полян, Н. И. Наймарк, И. Н. Заславский (унифицированная методика) [17], А. В. Шмидт, В. С. Антонюк, А. Франчини [18], А. А. Угрюмова [19], Н. А. Трунова. [20, 21], Х. Учида и Э. Нельсон [22]. Определение факторов формирования пространственной структуры агломерации и применения пространственных индексов для анализа изменений окружающей среды пространственной системы с целью частичной характеристики изменений в пространстве рассмотрены в исследованиях Hashem Dadashpoor и Neda Malekzadeh, Sumya Tasnim, Farzana Mahbub, Gopa Biswas и Dewan Mohammad Enamul Haque [23, 24]. Среди существующих подходов к оценке также следует выделить методику Института географии РАН и методику ЦНИИП градостроительства. Однако следует подчеркнуть, что несмотря на внушительное количество методических материалов по оценке развития территорий, удовлетворить в полной мере актуальные запросы по оценке уровня пространственного развития городских агломераций до сих пор не удалось. В настоящее время сложилась тенденция к пониманию некоторыми исследователями понятия «пространственное развитие», связанного с понятием «социально-экономическое развитие», что, в конечном итоге, не является истинно верным по причине различия в признаках, характеризующих эти процессы. Таким образом, и в существующих методиках оценки рассматриваются только лишь социально-экономические показатели. В связи с этим, обоснована возникающая потребность в совершенствовании и корректировке существующих подходов или разработке более универсальной методики, которая позволяла бы оценивать земли городских агломераций в контексте пространственного развития, в том числе и с точки зрения материально-террито-

риального базиса. Кроме того, результаты проведенных оценок могут применяться в мониторинговых целях для отслеживания процессов, происходящих внутри городской агломераций, на основе чего органами государственного управления и органами местного самоуправления могут приниматься соответствующие управленческие решения для формирования и корректировки стратегических мероприятий с целью развития территории. При этом важно иметь возможность проводить межагломерационные сравнения, рассматривая конкретные земли городских агломераций на фоне других, претерпевающих сходные процессы. Главным преимуществом разработанной методики должна стать возможность учета неоднородности состава агломерации, простота ее применения и при этом возможное базирование на доступных на регулярной основе данных.

На основе анализа существующих методик оценки уровня развития городских агломераций становится возможным формирование методических основ для оценки уровня пространственного развития земель городской агломерации при использовании метода интегрального показателя, который дает возможность с помощью множества отдельных показателей определить уровень пространственного развития (социально-экономического и территориального) земель в определенный период времени с помощью приведения условий к однокритериальной задаче, в результате, аккумуляция существующих подходов к оценке происходит через сочетание нескольких методик, их модификацию, включение дополнительных показателей, расширяя возможности анализа развития земель городских агломераций. Анализ используемых методик оценки уровня пространственного развития показал, что рассматриваются только лишь социально-экономические показатели, в связи с чем предлагается внесение территориальных показателей в комплексную оценку уровня про-

странственного развития территорий крупных городов и прилегающих муниципальных районов, позволяющих дополнить оценку территории с точки зрения материально-территориального базиса, так как прежде всего земля является плацдармом для любого, в том числе и социально-экономического развития.

Опробование разработанной методики оценки осуществлено на землях Тюменской городской агломерации. Городской округ город Тюмень является ядром исследуемой агломерации, в первый пояс агломерации попадают Тюменский и Нижнетавдинский муниципальные районы, второй пояс агломерации представлен городским округом городом Ялуторовск, Ялуторовским, Исетским и Ярковским муниципальными районами. Тюменская агломерация характеризуется как менее тесная и слабосвязанная агломерационная система расселения, имеющая обширные территории и включающая значительные субурбанизированные зоны. Агломерация является моноцентрической, по данным Росстата на 1 января 2024 г. численность ее населения составила 1,004 млн чел., площадь территории – 0,41 га.

Для объективной оценки земель сформировавшейся городской агломерации и определения ее места в общей стратегии развития государства следует учесть множество показателей разной направленности, совокупность указанных показателей должна быть систематизирована и сведена в единую легкую интерпретируемую систему, способную отражать сильные и слабые стороны городских территорий [25, 26].

На основе установления корреляционных связей и определения силы корреляции из представленных 32 групп, насчитывающих 615 показателей, были сформированы две группы показателей, характеризующих пространственное развитие территории с точки зрения социально-экономического и территориального развития (табл. 1).

Таблица 1. Классификация показателей пространственного развития

№	Социально-экономические показатели	Единица измерения	№	Территориальные показатели	Единица измерения
1	Объем отгруженных товаров на 1 чел.	млн руб.	1	Площадь территории	км ²
2	Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата	руб.	2	Доступность пункта, входящего в состав агломерации	км
3	Коэффициент миграционного прироста на 1 000 чел.	-	3	Плотность автомобильной сети	км/км ²
4	Продукция сельского хозяйства, на 1 000 чел.	млн руб.	4	Транспортная обеспеченность населения	км/тыс. чел.
5	Ввод жилья на 1 чел.	м ²	5	Уровень транспортной инфраструктуры (коэффициент Энгеля)	-
6	Оборот розничной торговли на 1 чел.	млн руб.	6	Концентрация транспортно-расселенческих структур (коэффициент Гольца)	-
7	Инвестиции в основной капитал на 1 000 чел.	млрд руб.	7	Выбросы в атмосферу на 1 чел.	тыс. тонн
8	Стоимость основных фондов на 1 000 чел.	млрд руб.	8	Затраты на охрану окружающей среды на 1 чел.	тыс. руб.
9	Среднегодовой темп роста численности	%	9	Плотность озелененности земель	%
			10	Плотность застроенности	м ² /га

Система репрезентативных показателей для оценки пространственного развития земель городской агломерации разработана с целью формирования методики оценки пространственного развития земель городской агломерации.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка пространственного развития земель городской агломерации предполагает выполнение следующих этапов.

1. Принятие решения об осуществлении оценки земель городской агломерации по уровню пространственного развития.

2. Подготовительный этап. Включает процесс сбора и анализа исходных данных для оценки; процесс определения факторов и критериев пространственного развития земель городской агломерации; процесс формирования системы показателей для оценки земель (в качестве источников информации, отражающих изменение необходимых показателей, выступают: Федеральная служба государственной статистики РФ, статистики федеральных ведомств: (Министерства связи РФ, Министерства финансов РФ, Министерства природы РФ, Федеральное казначейство

и Центральный банк РФ), материалы, полученные от субъектов Российской Федерации в ходе осуществления мониторинга и разработки прогнозов развития регионов); процесс формирования системы показателей, основанный на использовании ряда дополнительных альтернативных источников, в том числе обзоров стратегических документов, отчетов о развитии исследуемых территорий, баз данных показателей муниципальных образований и др.

3. Основной этап (проведение анализа и расчетных процедур по качественным и количественным показателям):

- сравнительная характеристика центра (ядра) городской агломерации и региона ее местонахождения (см. рис. 1);

- характеристика первичной позиции центра (ядра) городской агломерации (см. рис. 1);

- характеристика первичной позиции городской агломерации (см. рис. 1);

- характеристика земель городской агломерации с точки зрения пространственного развития территории (рис. 2).

4. Заключительный этап (представление интерпретированных результатов в виде картографического материала, определение уровня пространственного развития территории) (рис. 3).

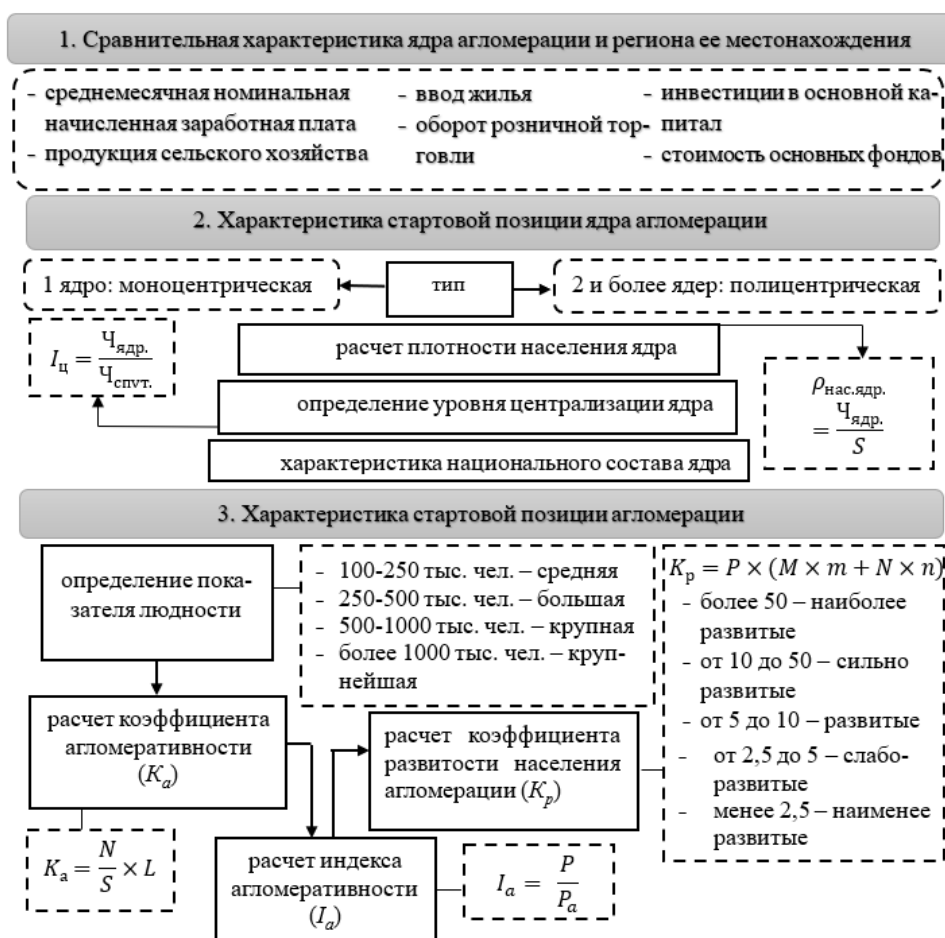


Рис. 1. Методическая схема оценки пространственного развития агломерации в результате характеристики агломерации, ее ядра и региона ее местонахождения



Рис. 2. Методическая схема оценки пространственного развития агломерации по результатам характеристики агломерации на основе показателей социально-экономической и территориальной группы

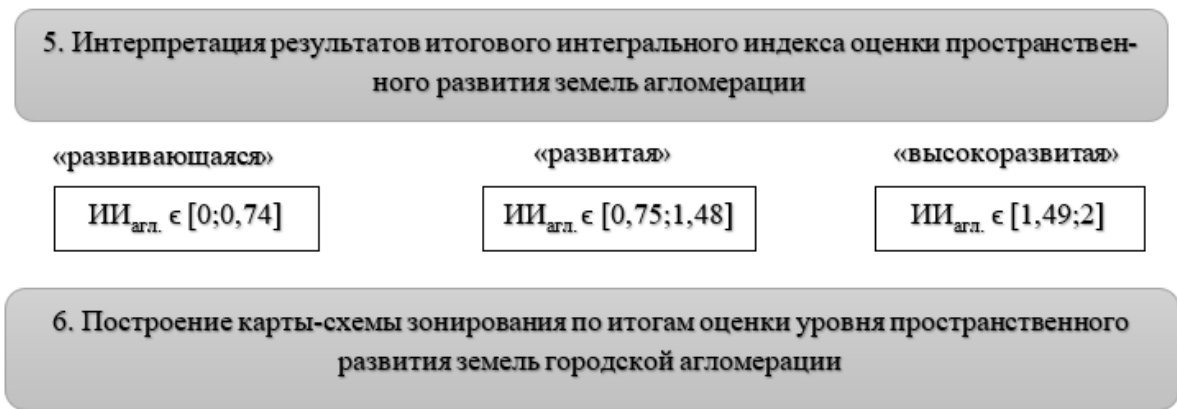


Рис. 3. Методическая схема оценки пространственного развития агломерации на заключительном этапе

Итоговый интегральный индекс агломерации складывается из итоговых интегральных индексов муниципальных образований, входящих в ее состав, и рассчитывается по следующей формуле:

$$ИИ_{агл.} = \sum_{k=1} ИИ_k^j, \quad (1)$$

где $ИИ_{агл.}$ – итоговый интегральный индекс агломерации; $ИИ_k^j$ – итоговый интегральный индекс муниципального образования j в составе агломерации.

Полученные значения итогового индекса можно интерпретировать согласно предложенной шкале (рис. 4).

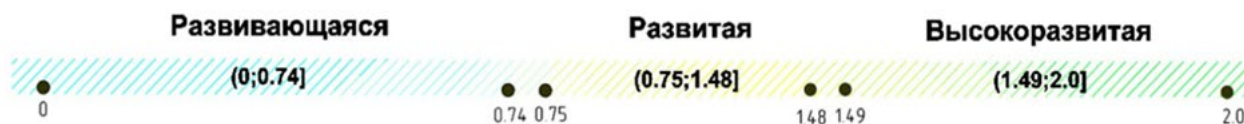


Рис. 4. Шкала для интерпретации результатов итогового интегрального индекса пространственного развития земель городской агломерации

Согласно данной шкале, промежуток значений от 0 до 0,74 включительно соответствует уровню «развивающаяся», который подразумевает стадию формирования агломерации (определения ядра и периферии), когда создаются общие рынки, налаживаются связи, при этом наблюдается нестабильность пространственного развития территории. Следующий промежуток значений от 0,75 до 1,48 включительно соответствует уровню «развитая», что означает завершение стадии формирования агломерации и становление ее точкой роста, при этом устанавливается взаимосвязь социально-экономических и территориальных показателей, уровень про-

странственного развития территории повышается. Заключительный уровень «высокоразвитая» соответствует промежутку значений от 1,49 до 2 включительно и отражает статус агломерации как ключевого элемента пространственного развития, что ведет к росту общих рынков и возможным проявлениям межагломерационных связей.

В результате расчета итогового интегрального индекса пространственного развития Тюменская агломерация занимает место развивающихся агломераций, так как расчетные значения показателя не превышают значения 0,74 (рис. 5, табл. 2).

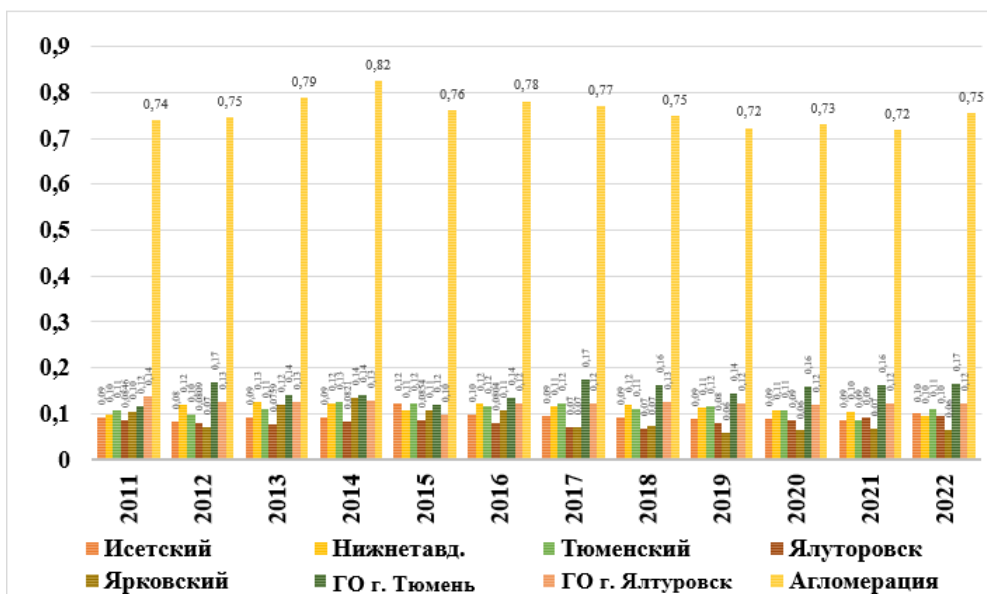


Рис. 5. Динамика значений индекса уровня пространственного развития Тюменской городской агломерации

Таблица 2. Значения индекса уровня пространственного развития Тюменской городской агломерации

ИИагл.	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Исетский	0,09	0,08	0,09	0,09	0,12	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
Нижнетавд.	0,10	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10
Тюменский	0,11	0,10	0,11	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,09	0,11
Ялуторовск	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10
Ярковский	0,10	0,07	0,12	0,14	0,11	0,11	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06
ГО г. Тюмень	0,12	0,17	0,14	0,14	0,12	0,14	0,17	0,16	0,14	0,16	0,16	0,17
ГО г. Ялуторовск	0,14	0,13	0,13	0,13	0,10	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12
Агломерация	0,74	0,75	0,79	0,82	0,76	0,78	0,77	0,75	0,72	0,73	0,72	0,75

Автоматизация процесса оценки пространственного развития земель городской агломерации предполагает разработку программного модуля для удобства применения авторской методики оценки, что будет представлено как перспектива дальнейшего исследования.

Заключение

Разработка подхода к оценке пространственного развития земель городских агломераций способствует решению проблем, связанных с обеспечением эффективного использования ресурсов территории, а также согласованное развитие отдельных элементов внутри нее. Кроме того, выполнение полного анализа исследуемой территории с точки зрения ее места в пространственном развитии и конкретизации этапа развития городской агломерации

является основой для формирования наиболее полной и комплексной концепции развития урбанизированной территории, планирования и реализации мероприятий по ее совершенствованию и содействию различным интересам и потребностям населения. Анализ групп показателей способен обеспечить определение приоритетных направлений развития территории с учетом ее экономических, социальных, экологических и территориальных особенностей и потребностей жителей, сравнение уровней развития для принятия обоснованных решений о перераспределении ресурсов. Оценка уровня пространственного развития земель городской агломерации позволит решить проблемы и добиться результатов по определению приоритетных направлений развития с учетом особенностей территории.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Меркурьева К. Р., Кряхтунов А. В. Агломерация – форма пространственного развития. Столыпинский вестник. 2022. Т. 4, № 8. DOI: 10.55186/27131424_2022_4_8_6.
2. Зубаревич Н. В. Развитие российских агломераций: тенденции, ресурсы и возможности управления. Общественные науки и современность. 2017. № 6. С. 5–21.
3. Хуснуллин М. Ш. Стратегия агрессивного развития инфраструктуры. Москва, 2021. 127 с.
4. Карпик А. П., Мусихин И. А., Ветошкин Д. Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 2. С. 155–163. DOI 10,33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
5. Карпик А. П., Жарников В. Б., Ларионов Ю. С. Рациональное землепользование в системе современного пространственного развития страны, его основные принципы и механизмы. Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24, № 4. С. 232–246.
6. Черных Е. Г., Сизов А. П., Филимонова Л. А. Формирование системы многоступенчатой оценки показателей пространственного развития территории, отражающей специфику сложностроенного субъекта (на примере Тюменской области). Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64, № 3. С. 320–329. DOI 10,30533/0536-101X-2020-64-3-320-329.
7. Черных Е. Г., Сизов А. П. Разработка программного обеспечения для анализа показателей пространственного развития территории. Пространственные данные: наука и технологии. 2021. № 12. С. 210–221. DOI 10,30533/scidata-2021-12-210-221.
8. Глазычев В. Л., Щедровицкий П. Г. Россия: принципы пространственного развития. Под ред. В. Л. Глазычева. М. : Центр стратегических исследований Приволжского федерального округа, 2004. 86 с.
9. Лексин В. Н. Городские агломерации и система расселения: надежды и опасения. Сборник материалов по проблемам развития городских агломераций в странах СНГ к НПК «Научные и практические аспекты формирования городских агломераций». М., 2011. С. 109.
10. Лаппо Г. М. Методика исследования региональных систем городских поселений. Региональные исследования. 2023. № 2(80). С. 5–11. DOI 10,5922/1994-5280-2023-2-1.
11. Лаппо Г. М., Полян П. М., Селиванова Т. В. Агломерации России в XXI веке. Вестник Фонда регионального развития Иркутской области. 2014. № 1. С. 45–52.
12. Камынина Н. Р. Планирование и развитие городских территорий. Вестник СГУГиТ. 2016. № 4 (36). С. 184–190.
13. Зубаревич Н. В. Экономическое развитие столичной агломерации после расширения Москвы. Геоурбанистика и градостроительство: теоретические и прикладные исследования : сборник статей. Отв. редактор А.Г. Махрова. Москва : Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2021. С. 141–154.
14. Н. И. Бурмакина, А. В. Илюшин, Т. В. Илюшина [и др.] Информационные ресурсы государственного кадастра недвижимости и территориального планирования в пространственном развитии государства : монография. Под общей редакцией А. П. Сизова. М. : Русайнс, 2016. 86 с. ISBN 978-5-4365-0627-2.
15. Аникина Ю. А., Литовченко В. И. Методика оценки дифференциации при регулировании социально-экономического развития городской агломерации. Сибирский аэрокосмический журнал. 2009. № 4. С. 169–172.
16. Волчкова И. В., Минаев Н. Н. Теория и практика управления развитием агломераций : монография – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 234 с.
17. Полян П. М., Заславский И. Н., Наймарк Н. И. Проблемы делимитации городских агломераций: сравнение и синтез ведущих методик. Проблемы территориальной организации пространства и расселения в урбанизированных районах. Свердловск. 1988. С. 26–40.
18. Шмидт А. В., Антонюк В. С., Франчини А. Городские агломерации в региональном развитии: теоретические, методические и прикладные аспекты. Экономика региона. 2016. Т. 12, вып. 3. С. 776–789.
19. Угрюмова А. А. Управление экономическим ростом агломераций: на примере Московской агломерации : автореф. дис. ... д-ра экон. наук. М., 2005. 44 с.
20. Трунова Н. А. Совершенствование методических подходов к анализу и оценке факторов, влияющих на развитие городских агломераций. Экономические науки. 2011. № 3 (76).

21. Трунова Н. А. Особенности социально-экономического развития городских агломераций в Российской Федерации. Мир экономики и права. 2010. № 4.
22. Uchida H. Nelson A. (2010): Agglomeration index: Towards a new measure of urban concentration, Working paper. World Institute for Development Economics Research. 2010. No. 29. P. 1–20.
23. Dadashpoor H., Malekzadeh N. (2020): Driving factors of formation, development, and change of spatial structure in metropolitan areas: A systematic review. Journal of Urban Management. 2020. Vol. 9. Issue 3. P. 286–297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2020.06.005>.
24. Tasnim S., Mahbub F., Biswas G., Haque D.M.E. (2022): Spatial indices and SDG indicator-based urban environmental change detection of the major cities in Bangladesh. Journal of Urban Management. 2022. Vol. 11. Issue 4. P. 519–529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.09.004>.
25. Меркурьева К. Р. Экологический аспект формирования пространственных систем. Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2021. № 2-1. DOI 10.24411/2658-3569-2021-10028.
26. Фирулина И. И., Сидоров А. А. Экологические аспекты городской среды. Самара : Самарский государственный экономический университет, 2018. 177 с.

REFERENCES

1. Merkurieva K. R., Kryakhtunov A.V. (2022) Agglomeration - a form of spatial development. *Stolypinskiy vestnik [Stolypin Bulletin]*, 4(8), 6 p. [in Russian]. DOI: 10.55186/27131424_2022_4_8_6.
2. Zubarevich, N. V. (2017). Development of Russian agglomerations: trends, resources and management capabilities. *Obshchestvennyye nauki i sovremennost' [Social sciences and modernity]*, 6, 5-21 [in Russian].
3. Khusnullin M. Sh. (2021) Strategy of aggressive infrastructure development. - 127 p. [in Russian].
4. Karpik, A. P., Musikhin, I. A., & Vetoshkin, D. N. (2021). Intelligent information models of territories as an effective tool for spatial and economic development. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(2), 155-163 [in Russian]. DOI 10,33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
5. Karpik, A. P., Zharnikov, V. B., & Larionov, Yu. S. (2019). Rational land use in the system of modern spatial development of the country, its basic principles and mechanisms. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 232-246 [in Russian].
6. Chernykh, E. G., Sizov, A. P., & Filimonova, L. A. (2020). Formation of a system of multi-stage assessment of indicators of spatial development of a territory, reflecting the specifics of a complex subject (using the example of the Tyumen region). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'yemka [Izvestia institutions of higher education, Geodesy and aerial photography]*, 64(3), 320-329 [in Russian]. DOI 10,30533/0536-101X-2020-64-3-320-329.
7. Chernykh, E. G., Sizov, A. P. (2021). Development of software for analyzing indicators of spatial development of the territory. *Prostranstvennyye dannyye: nauka i tekhnologii [Spatial data: science and technology]*, 12, 210-221 [in Russian]. DOI 10,30533/scidata-2021-12-210-221.
8. Glazychev, V. L., Shchedrovitsky, P. G. (2004). *Rossiya: printsipy prostranstvennogo razvitiya [Russia: principles of spatial development]*. V. L. Glazychev (Ed.). Moscow: Center for Strategic Research of the Volga Federal District [in Russian].
9. Leksin, V. N. (2011). Urban agglomerations and settlement system: hopes and fears In *Sbornik materialov po problemam razvitiya gorodskikh aglomeratsiy v stranakh SNG k NPK "Nauchnyye i prakticheskiye aspekty formirovaniya gorodskikh aglomeratsiy" [Collection of materials on the problems of development of urban agglomerations in the CIS countries for the scientific and practical complex "Scientific and practical aspects of the formation of urban agglomerations"]* (P. 109). Moscow. [in Russian].
10. Lappo, G. M. (2023). Methodology for studying regional systems of urban settlements *Regional'nyye issledovaniya [Regional studies]*, 2(80), 5-11 [in Russian]. DOI 10,5922/1994-5280-2023-2-1.
11. Lappo, G. M. Polyan, P. M., & Selivanova, T. V. (2014). Agglomerations of Russia in the XXI century. *Vestnik Fonda regional'nogo razvitiya Irkutskoy oblasti [Bulletin of the Regional Development Fund of the Irkutsk Region]*, 1, 45-52 [in Russian].
12. Kamynina, N. R. (2016). Planning and development of urban areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 184-190 [in Russian].
13. Zubarevich, N. V. (2021) Economic development of the capital agglomeration after the expansion of Moscow. In *Sbornik statey Geourbanistika i gradostroitel'stvo: teoreticheskiye i prikladnyye issledovaniya [Geourbanistics and urban planning: theoretical and applied research:*

Collection of articles]. A. G. Makhrova (Ed.). (pp. 141-154). Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University named after M.V. Lomonosov. [in Russian].

14. Burmakina, N. I., Ilyushin, A. V., Ilyushina, T. V. et al. (2016) *Informacionnyye resursy gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti i territorial'nogo planirovaniya v prostranstvennom razvitii gosudarstva [Information resources of the state real estate cadastre and territorial planning in the spatial development of the state]*: A. P. Sizov (Ed.). Moscow: Rusains; [in Russian]. ISBN 978-5-4365-0627-2.

15. Anikina, Yu. A., Litovchenko, V. I. (2009). Methodology for assessing differentiation in regulating the socio-economic development of an urban agglomeration. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal [Siberian Aerospace Journal]*, 4, 169-172. [in Russian].

16. Volchkova, I. V., Minaev N. N. (2014). *Theory and practice of managing the development of agglomerations [Teoriya i praktika upravleniya razvitiyem aglomeratsiy]* Tomsk: Publishing house of Tomsk state university of architecture and civil engineering. 234 p. [in Russian].

17. Polyanyan, P. M., Zaslavsky, I. N., Naimark, N. I. (1988). Problems of delimitation of urban agglomerations: comparison and synthesis of leading methods. *Problemy territorial'noy organizatsii pro-stranstva i rasseleniya v urbanizirovannykh rayonakh. Sverdlovsk. [Problems of territorial organization of space and settlement in urbanized areas. Sverdlovsk]*. 26-40 [in Russian].

18. Schmidt, A. V., Antonyuk, V. S., & Franchini, A. (2016). Urban agglomerations in regional development: theoretical, methodological and applied aspects. *Ekonomika regiona [Economics of the region]*, 12(3), 776-789 [in Russian].

19. Ugryumova, A. A. (2005) *Upravleniye ekonomicheskim rostom aglomeratsiy: na primere Moskovskoy aglomeratsii [Management of economic growth of agglomerations: on the example of the Moscow agglomeration]: Extended abstract of doctor's thesis*. Moscow. [in Russian].

20. Trunova, N. A. (2011). Improving methodological approaches to the analysis and assessment of factors influencing the development of urban agglomerations. *Ekonomicheskiye nauki [Economic sciences]*, 3(76) [in Russian].

21. Trunova, N. A. (2010). Features of the socio-economic development of urban agglomerations in the Russian Federation. *Mir ekonomiki i prava [World of Economics and Law]*, 4 [in Russian].

22. Uchida, H., Nelson, A. (2010). Agglomeration index: Towards a new measure of urban concentration, Working paper. [World Institute for Development Economics Research], 29, 1-20.

23. Dadashpoor, H., Malekzadeh, N. (2020). Driving factors of formation, development, and change of spatial structure in metropolitan areas: A systematic review [Journal of Urban Management], 9(3), 286-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2020.06.005>.

24. Tasnim, S., Mahub, F., Biswas, G., Haque, D.M.E. (2022). Spatial indices and SDG indicator-based urban environmental change detection of the major cities in Bangladesh [Journal of Urban Management], 11(4), 519-529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.09.004>.

25. Merkurieva, K. R. (2021). Ecological aspect of the formation of spatial systems. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy Integral [International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral]*, 2(1) [in Russian].

26. Firulina, I. I., Sidorov, A. A. (2018). *Ekologicheskiye aspekty gorodskoy sredy [Ecological aspects of the urban environment]*. Samara: Samara State Economic University, 177 p. [in Russian].

Об авторах

Ольга Викторовна Богданова – доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой геодезии и кадастровой деятельности.

Кристина Рудольфовна Меркурьева – старший преподаватель кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Author details

Olga V. Bogdanova – D.Sc, Associate Professor, Head of the Department of Geodesy and Cadastral Activities.

Kristina R. Merkurieva – Senior Lecturer, Department of Geodesy and Cadastral Activities.

Получено / Received 07.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.11.2025

Принята к публикации / Accepted 16.12.2025

УДК 332.2:332.334.4

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-137-146>

Пространственный анализ распределения величины внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости и прибыли предпринимателя на территории крупного города (на примере гаражной недвижимости)

Д. В. Кубраков^{1,2✉}, Т. Н. Жигулина²

¹Алтайский центр недвижимости и государственной кадастровой оценки,
г. Барнаул, Российская Федерация

²Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул, Российская Федерация

e-mail: d_kubrakov@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено пространственному анализу распределения величины внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости и прибыли предпринимателя на территории крупного города – города Барнаула. В основу исследования положены выборочный метод, метод парных продаж, метод статистического (регрессионного) моделирования величин внешнего (экономического) устаревания, прибыли предпринимателя. Приведены собственные теоретические исследования, выявившие, что внешняя среда объектов недвижимости подчиняется закономерностям этапного развития систем, включающего становление, стабилизацию, спад и гибель внешней среды. Каждому из перечисленных этапов развития соответствует свое состояние внешней среды объектов недвижимости (выявлено четыре таких состояния), о котором сигнализируют определенные индикаторы. Впервые установлено, что индикаторами состояния внешней среды являются внешнее (экономическое) устаревание и прибыль предпринимателя. Произведенный пространственный анализ распределения величины прибыли предпринимателя, внешнего (экономического) устаревания приведен на примере объектов гаражной недвижимости на территории города Барнаула.

Ключевые слова: массовая (кадастровая) оценка, внешнее устаревание, прибыль предпринимателя, пространственное распределение, индикаторы состояния внешней среды

Для цитирования:

Кубраков Д. В., Жигулина Т. Н. Пространственный анализ распределения величины внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости и прибыли предпринимателя на территории крупного города (на примере гаражной недвижимости). *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 137–146. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-137-146>

Spatial analysis of external (economic) obsolescence and entrepreneurial profit distribution in a large city (the case of garage property)

D. V. Kubrakov^{1,2✉}, T. N. Zhigulina²

¹Altai Centre for Real Estate and State Cadastral Valuation, Barnaul, Russian Federation

²Altai State Agrarian University, Barnaul, Russian Federation

e-mail: d_kubrakov@mail.ru

Abstract. The study examines the spatial distribution of external (economic) obsolescence and entrepreneurial profit for real estate assets across the city of Barnaul, a major urban center. It employs selective sampling, the paired sales method, and statistical (regression) modeling to quantify external

obsolescence and entrepreneurial profit. Original theoretical analysis reveals that the external environment of real estate follows phased system development patterns (formation, stabilization, decline, and demise) each corresponding to one of four distinct environmental states revealed by specific indicators. For the first time, external (economic) obsolescence and entrepreneurial profit are identified as primary indicators of these states. The spatial analysis of their distribution is illustrated using garage properties in Barnaul.

Keywords: mass (cadastral) valuation, external obsolescence, entrepreneurial profit, spatial distribution, indicators of external environment state

For citation:

Kubrakov D. V., Zhigulina T. N. (2026). Spatial analysis of external (economic) obsolescence and entrepreneurial profit distribution in a large city (the case of garage property). *Vestnik SSUGiТ [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 137–146. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-137-146>

Введение

Существование объектов недвижимости, согласно современным представлениям теории оценки недвижимости, происходит во внешней среде. К настоящему времени отечественные и зарубежные исследования в этой области направлены на построение моделей факторного анализа влияния внешней среды рынка недвижимости по средствам перечисления или группировки факторов [1]. При этом отсутствует анализ каких-либо показателей, которые могли бы характеризовать различные стадии развитости внешней среды, а также влиять на формирование величины рыночной стоимости.

Рассматривая разницу между уровнем рыночной стоимости объекта недвижимости и затратами на его воспроизводство в практике оценки выделяют реализованную прибыль или убыток. Рассчитанная таким образом величина позволяет выразить влияние факторов внешней среды (макроэкономических и отраслевых) и понять, обладает ли каждый конкретный объект недвижимости в этих условиях уровнем полезности, востребованным рынком, то есть прибылью предпринимателя или, напротив, теряет свою стоимость вследствие появления величины внешнего (экономического) устаревания. Появление внешнего устаревания или прибыли предпринимателя обусловлено факторами, не относящимися непосредственно к объекту недвижимости, и, по нашему мнению, может быть использовано в качестве объективного индикатора, выражающего состояние внешней среды объектов недвижимости.

В современной научной литературе феномен внешнего устаревания и прибыли предпринимателя в сфере недвижимости исследован с точки зрения формулирования основных

понятий [2–7], исследования факторов внешней среды объектов недвижимости [8–10], практического моделирования [11–15], встречаются отдельные работы с пространственным описанием распределения величины внешнего (экономического) устаревания [16].

В системе государственной кадастровой оценки величина внешнего (экономического) устаревания/прибыли предпринимателя является одной из ключевых при определении кадастровой стоимости объектов недвижимости (за исключением земельных участков) затратным подходом. Однако способ ее расчета, приведенный в Методических указаниях о государственной кадастровой оценке (Методические указания о государственной кадастровой оценке, утв. приказом Росреестра от 04.08.2021 № п/0336. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_403900/. – Текст: электронный; далее – Методические указания) не позволяет получать дифференцированные значения на территории проведения оценки, что является весомой практической проблемой оценки, поскольку рассчитанная затратным подходом кадастровая стоимость (без дифференциации величин внешнего (экономического) устаревания/прибыли предпринимателя) не соотносится с величинами этих же объектов на рынке недвижимости.

С целью разработки варианта решения указанной выше проблемы нами предпринята попытка пространственного анализа результатов определения величин внешнего устаревания / прибыли предпринимателя на территории города Барнаула, полученных авторами при расчете кадастровой стоимости гаражей в рамках проведения государственной кадастровой оценки зданий, помещений, сооружений, объектов незавершенного строительства, ма-

шино-мест, учтенных в Едином государственном реестре недвижимости на территории Алтайского края по состоянию на 01.01.2023.

Цель исследования – провести пространственный анализ распределения величин внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости / прибыли предпринимателя гаражей на территории крупного города – города Барнаула.

Задачи исследования:

1) изучить пространственно-временные закономерности изменчивости внешней среды объектов недвижимости;

2) провести пространственный анализ распределения величины прибыли предпринимателя / внешнего (экономического) устаревания на территории города Барнаула на примере гаражей.

Объекты и методы исследования

Выбор объекта исследования обусловлен наличием практической проблемы, возникшей при проведении государственной кадастровой оценки, в отношении объектов гаражной недвижимости, однако, исследование с равным успехом могло быть проведено и в отношении других объектов недвижимости на территории города Барнаула, поскольку в основу определения величин внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости / прибыли предпринимателя положена универсальная методика расчета таких показателей в разрезе кадастровых кварталов, опубликованная нами ранее [7]. Анализ пространственного распределения величин также производился с учетом авторских теоретических исследований (подробно описаны ниже), раскрывающих общие закономерности пространственно-временной изменчивости внешней среды объектов недвижимости в целом.

Объектом исследования выступили гаражи, объединенные в следующие функциональные группы: «гаражи индивидуальные отдельностоящие», «гаражные кооперативы (сблокированные индивидуальные гаражи)», «паркинги (в том числе: подземные паркинги, наземные паркинги, паркинги с подземной и наземной частью (смешанные)», «гаражи производственные, ведомственные для легковых автомобилей», «гаражи производственные, ведом-

ственные для грузовых автомобилей и автобусов». Общее количество гаражей на территории города Барнаула, в отношении которых смоделированы значения величин внешнего (экономического) устаревания, прибыли предпринимателя составило 42 919 объектов.

В основу исследования положены выборочный метод, метод парных продаж, метод статистического (регрессионного) моделирования.

Использование выборочного метода позволило отобрать порядка 150 наблюдений за ценой предложения объектов гаражной недвижимости на рынке, в отношении которых методом парных продаж определено значение величин внешнего устаревания и прибыли предпринимателя, положенных затем в основу контроля качества результатов расчета по статистической модели.

Метод статистического (регрессионного) моделирования использован для воспроизводства величин внешнего (экономического) устаревания и величин прибыли предпринимателя с использованием набора независимых факторов.

Результаты исследования

Под внешней средой объектов недвижимости в теории массовой оценки будем понимать такую систему, сформированную факторизованным окружением, имеющую с системой объектов недвижимости взаимодействия, направленные на организацию сложных обменных процессов, в результате которых в системе объектов недвижимости формируется определенный уровень стоимости (объектов недвижимости), а во внешней среде – качественное приращение ее ресурсов.

Внешняя среда объектов недвижимости, являясь системой, подвержена постоянному процессу развития. Развиваясь, внешняя среда следует временной и пространственным линиям развития.

Вследствие пространственной изменчивости внешняя среда реагирует неодинаково на воздействие физического и экономического пространств, поэтому возникает сдвиг фаз ритмов во времени и пространстве, что придает внешней среде объектов недвижимости мозаичность.

В этой связи пространственно-временную изменчивость внешней среды объектов недвижимости следует рассматривать как внутренний процесс последовательной смены состояний

внешней среды (укрупненно показан на рис. 1). При этом протекание процессов этапности развития внешней среды как системы подчинено

системным законам и принципам, которые являются выражением общих законов диалектики и не требуют повторного доказательства.

<p>1 Этап становления внешней среды</p> <p>Состояние внешней среды объектов недвижимости: развивающаяся, стремящаяся к однородности</p> <p>Индикатор состояния: минимальное значение прибыли предпринимателя</p>	<p>Этап стабилизации внешней среды 2</p> <p>Состояние внешней среды объектов недвижимости: развитая, однородная</p> <p>Индикатор состояния: максимальное значение прибыли предпринимателя</p>
<p>4 Этап гибели внешней среды</p> <p>Состояние внешней среды объектов недвижимости: деградирующая, неоднородная</p> <p>Индикатор состояния: максимальное значение внешнего устаревания</p>	<p>Этап стагнации внешней среды 3</p> <p>Состояние внешней среды объектов недвижимости: остановившаяся в развитии, стремящаяся к неоднородности</p> <p>Индикатор состояния: минимальное значение внешнего устаревания</p>

Рис. 1. Соответствие этапов развития и состояний внешней среды объектов недвижимости

Смена состояний внешней среды объектов недвижимости соответствует прохождению ей определенных этапов своего развития. Так, например, этапу становления внешней среды как системы соответствует развивающаяся, стремящаяся к однородности внешняя среда объектов недвижимости, индикатором состояния которой выступают, как правило, минимальные значения прибыли предпринимателя.

Процесс прохождения этапов развития внешней среды как системы происходит постоянно на отдельных, локальных ее участках. Определение границ таких участков внешней среды, как первичных единиц является предметом дальнейших исследований. В рамках настоящего исследования все значения показателей рассчитаны по кадастровым кварталам.

Другими словами, на одной и той же территории, в одно и то же время, могут нахо-

диться участки с разным состоянием внешней среды. Более того, разным видам объектов недвижимости на одной территории также могут соответствовать разные состояния внешней среды объектов недвижимости.

Рассмотрим сложившиеся территориальные закономерности состояния внешней среды объектов гаражной недвижимости сквозь призму приведенных теоретических исследований.

В результате статистического моделирования величин внешнего (экономического) устаревания и прибыли предпринимателя было определено 42 919 значений в отношении гаражей, расположенных в 1 188 кадастровых кварталах на территории города. Распределение величин в разрезе кадастровых кварталов представлено на рис. 2.

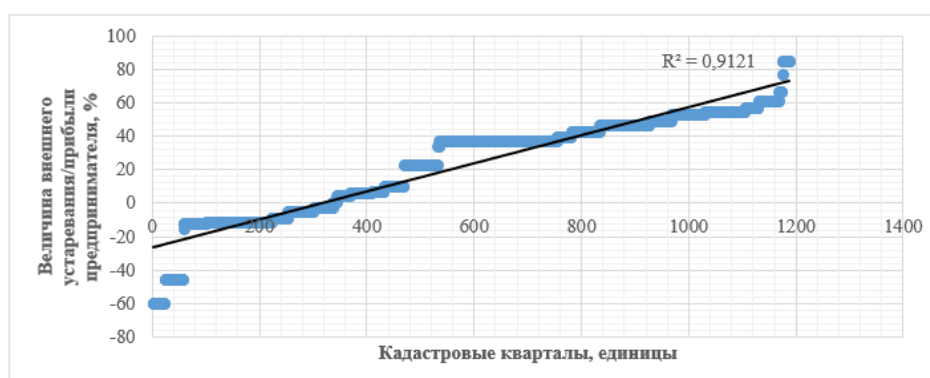


Рис. 2. Распределение величин внешнего устаревания / прибыли предпринимателя по кадастровым кварталам на территории города Барнаула

Среднее арифметическое значение величины внешнего устаревания объектов гаражной недвижимости на территории города рассчитано на уровне $-15,9\%$ и характеризуется значительной вариацией, рассеиванием наблюдений возле среднего значения (таблица). Выдвинутый тезис подтверждается высоким значением дисперсии выборки (268,9) и величиной стандартного отклонения (16,4 %), превышающей значение среднего арифметического на 0,52 единицы. Изменчивость рассматриваемого вариационного ряда значительна, поскольку коэффициент вариации составляет 103,3 %.

Для характеристики средней величины варьирования средней арифметической рассчитали значение m , равное 0,89; именно этот показатель дает представление о среднем размахе колебаний для среднего значения величины внешнего устаревания гаражей ($\bar{X} \pm m$) $-15,9 \pm 0,89$, а тройная ошибка ($\bar{X} \pm 3m$) $-15,9 \pm 2,67$ свидетельствует о предельной ошибке среднего арифметического. Точность наблюдения за внешним устареванием объектов недвижимости оценена показателем точности выборочного наблюдения (опыта) и составила 5,6 %, что соответствует градации «удовлетворительной» точности.

Статистические показатели выборки значений внешнего (экономического) устаревания / прибыли предпринимателя

Название выборки	Статистические показатели выборки									
	Среднее значение, %	Минимальное значение, %	Максимальное значение, %	Стандартное отклонение	Дисперсия выборки	Экссес	Асимметричность	Коэффициент вариации, %	Ошибка выборочной средней (репрезентативности)	Точность выборочного наблюдения, %
Внешнее устаревание	-15,9	-60,0	-2,0	16,4	268,9	1,6	1,7	103,2	0,89	5,6
Прибыль предпринимателя	38,8	1,0	85,0	17,4	302,1	0,1	0,5	44,8	0,59	1,5

Показатели вариации внешнего устаревания гаражей, их отличия от средней величины в большую сторону сформировали положительную (правостороннюю) асимметрию (1,7). Поскольку рассматриваемое распределение характеризуется частым появлением как средних, так и крайних значений величины внешнего устаревания объектов недвижимости, то его следует отнести к положительным эксцессивным распределениям.

Средние значения прибыли предпринимателя в отношении гаражей рассчитаны на уровне 38,8 %, хотя вариационный ряд включает значения от 1 до 85 %. Показатели вариации, рассеивания значений прибыли предпринимателя значительно меньше, данные менее разнообразны, чем аналогичные показатели в отношении величины внешнего устаревания: величина стандартного отклонения более чем в два раза меньше средней арифметической величины прибыли предпринимателя

(17,4 %); коэффициент вариации (44,8 %) при сопоставимом значении величины дисперсии (302,1).

Средний размах колебаний среднего значения величины прибыли предпринимателя ($\bar{X} \pm m$) составил $38,8 \pm 0,59$, а предельная ошибка среднего арифметического ($\bar{X} \pm 3m$) равна $38,8 \pm 1,77$. Точность наблюдения величины прибыли предпринимателя составила 1,5 %, что характеризуется как «хорошая».

Распределение прибыли предпринимателя характеризуется слабopоложительной асимметричностью и незначительным положительным эксцессом.

Для анализа внутрирайонного распределения изучаемых показателей использованы принципы деления территории на типовые территориальные зоны, описанные в исследовании [17] компании «Информ-оценка» для крупных городов России. Результаты приведены по административным районам города.

На территории Железнодорожного района (рис. 3) города Барнаула отсутствуют рассчитанные значения величины прибыли предпринимателя на объекты гаражной недвижимости. Среднее значение внешнего устаревания гаражей составило $-17,5\%$ и характеризуется высокими значениями показателей рассеивания: стандартного отклонения ($16,6\%$), дисперсии выборки ($275,4$) и коэффициента вариации ($94,6\%$). Наибольшее

значение величины внешнего устаревания объектов гаражной недвижимости – в производственной зоне (-60%). Наиболее близкое к среднерайонному значение внешнего устаревания у гаражей, расположенных в зоне малоэтажной жилой застройки -11% , наименьшее значение в зоне среднеэтажной жилой застройки, на территориях центров деловой активности и крупных автомагистралей города $-5,5$ и 9% соответственно.

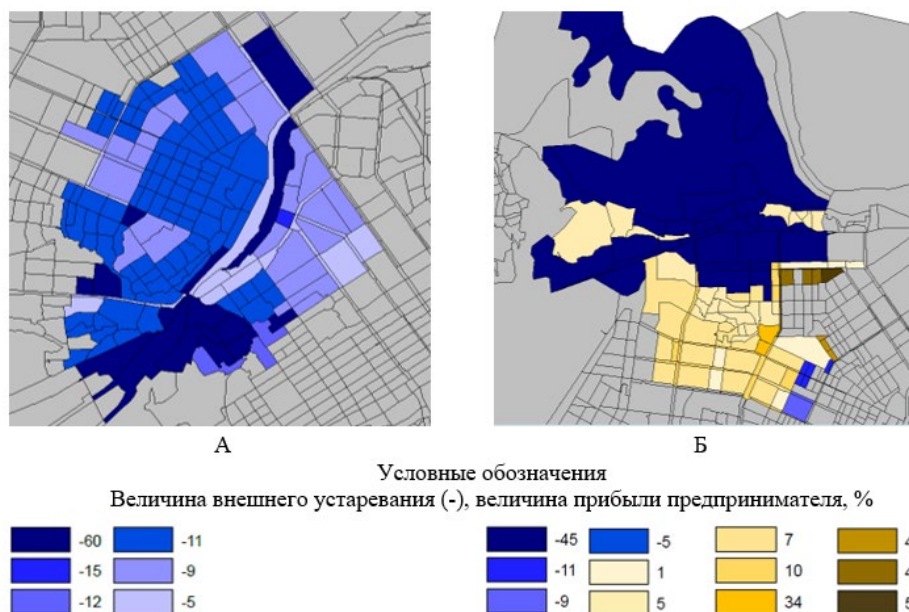


Рис.3. Картограммы пространственного распределения величин внешнего устаревания/прибыли предпринимателя на территории Железнодорожного (А) и Ленинского (Б) районов города Барнаула

Среднее значение величины внешнего устаревания гаражей на территории Ленинского района (см. рис. 3) рассчитано на уровне $-45,0$. На территории района внешнему устареванию подвержены объекты гаражной недвижимости, расположенные в производственной зоне и на окраине. Среднее значение величины прибыли предпринимателя в районе составляет $12,3\%$. Значение дисперсии выборки ($65,4$), коэффициента вариации ($65,8\%$) свидетельствуют о значительной неоднородности (рассеивании) наблюдений за величиной прибыли предпринимателя. Наиболее близкие к среднему значения прибыли предпринимателя на территории района определены в отношении объектов гаражной недвижимости, расположенных

в зоне крупных автомагистралей города ($10,0\%$), на территориях центров деловой активности ($10,0\%$), зоне среднеэтажной жилой застройки ($7,0\%$), зоне малоэтажной жилой застройки ($5,0\%$). Наименьшее значение прибыли предпринимателя в 1% соответствует гаражам, расположенным в зеленой зоне.

В Центральном районе (рис. 4) величины прибыли предпринимателя и внешнего устаревания определены в отношении объектов гаражной недвижимости, расположенных в 747 кадастровых кварталах, из них в отношении объектов 42 кварталов отмечено внешнее устаревание, в среднем, на уровне -12% . Среднее значение величины прибыли предпринимателя, сложившееся в отношении гаражей в Центральном районе, равняется $43,9\%$.

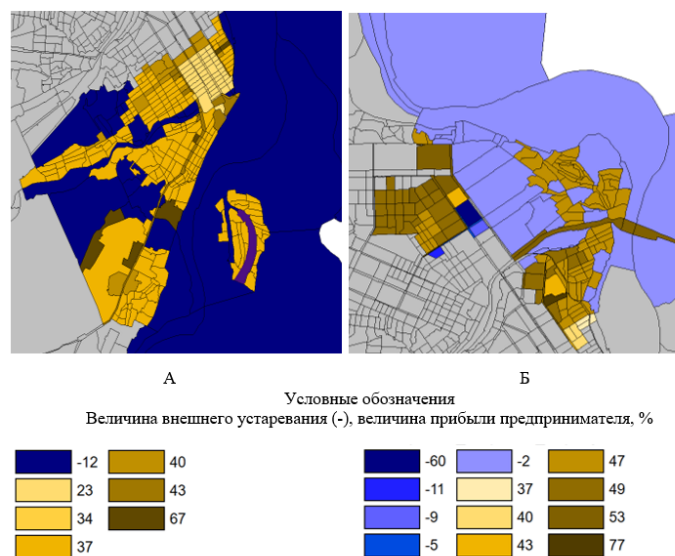


Рис. 4. Картограммы пространственного распределения величин внешнего устаревания/прибыли предпринимателя на территории Центрального (А) и Октябрьского (Б) районов города Барнаула

Изменчивость средней, выраженная коэффициентом вариации (23,2 %), является значительной. Значение величины прибыли предпринимателя, значительно превышающее среднее районное значение, рассчитано в отношении гаражей, расположенных в зоне современной высотной застройки и составило 67,0 %. Наименьшее значение величины прибыли предпринимателя в районе рассчитано на территории культурного и исторического центра города.

На территории Октябрьского района (см. рис. 4) наряду с прибылью предпринимателя, рассчитанной на объекты гаражной недвижимости, расположенные в 394 кадастровых кварталах, присутствует и внешнее устаревание для объектов, расположенных в 36 кварталах. Значение величин внешнего устаревания в среднем сложилось на уровне $-2,0\%$, это значение соответствует гаражам в производственных зонах и на окраинах. Среднее значение прибыли предпринимателя в отношении гаражей на территории Октябрьского района рассчитано на уровне $51,5\%$, показатели, характеризующие вариацию, рассеивание наблюдений возле среднего значения, обладают минимальными значениями: дисперсия выборки 33,8, стандартное отклонение $5,82\%$; коэффициент вариации $-11,3\%$, что является средним значением.

Незначительно превышают среднее в районе средние значения прибыли предпринимателя гаражей в зонах крупных автомагистралей города и центрах деловой активности -53% , близки к среднерайонному показателю прибыли предпринимателя в зонах среднеэтажной жилой застройки, малоэтажной жилой застройки, зеленой зоне $-49,0, 47,0$ и $43,0\%$ соответственно.

Среднее значение рассчитанной прибыли предпринимателя на территории Индустриального района (рис. 5) в отношении объектов гаражной недвижимости составляет $40,2\%$, что является самым высоким средним показателем прибыли предпринимателя в городе. Рассматриваемый показатель сильно варьирует от 6 до 85% на территории района, коэффициент вариации равняется $40,5\%$, что соответствует значительной вариации.

На территории Индустриального района наибольшее значение величины прибыли предпринимателя определено в отношении гаражей, расположенных в 13 кадастровых кварталах современной высотной застройки ($85,0\%$), значения выше среднерайонного определены в отношении зон крупных автомагистралей, на территориях центров деловой активности, малоэтажной жилой застройки, среднеэтажной жилой застройки. Наименьшее значение прибыли предпринимателя определено в отношении гаражей в производственной зоне и на окраинах.

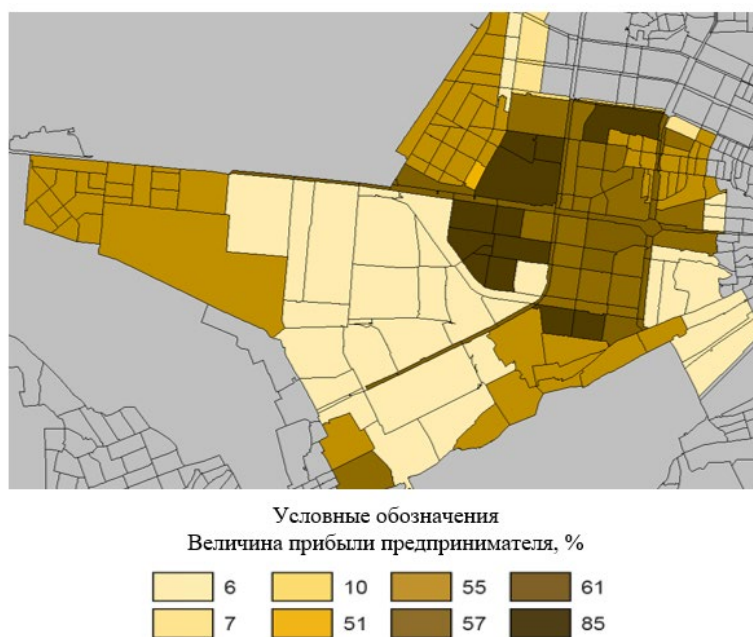


Рис. 5. Картограмма пространственного распределения величин внешнего устаревания/прибыли предпринимателя на территории Индустриального района города Барнаула

Таким образом, территориями, охваченными внешней средой, находящейся на этапе становления, являются зоны малоэтажной, среднеэтажной застройки в Ленинском районе города, промышленная зона в Индустриальном районе; эти территории характеризуются минимальным значением величины прибыли предпринимателя. Этап зрелости с однородной, развитой внешней средой объектов гаражной недвижимости характерен для районов современной высотной застройки в Индустриальном районе, Октябрьском районе (район улицы Советской и проспекта Комсомольского), в Центральном районе (район Змеиногорского тракта), в Ленинском районе (район микрорайона Западного). Также к этой категории развитости внешней среды гаражей можно отнести районы крупных автомагистралей города – Павловский тракт, Змеиногорский тракт, улицы Попова, Малахова, Кулагина, Промышленную.

Стадию стагнации переживает внешняя среда объектов гаражной недвижимости, относящаяся к восточной части Северного промышленного района – между ул. Цеховой и ул. Малахова (Октябрьский район), территории малоэтажной и среднеэтажной застройки в Октябрьском, Ленинском районах. При этом стоит отметить, что компенсировать негатив-

ные процессы появляющейся неоднородности среды возможно, применив комплексный подход к редевелопменту этих территорий. Например, в проекте генерального плана развития города Барнаула в микрорайоне «Поток» предусмотрен проект комплексного развития территорий на 26,9 га. Планируется комплекс мероприятий по развитию данной территории с обеспечением социальной, инженерной, транспортной инфраструктурой.

Этапом гибели внешней среды можно охарактеризовать внешнюю среду расположения гаражей в Железнодорожном районе (район пос. им. Осипенко, железнодорожных путей); объектом гаражной недвижимости, расположенным здесь соответствует максимальное значение величины внешнего (экономического) устаревания в городе. Согласно теоретическим представлениям гибель как этап развития системы, завершающий цикл развития, сопровождается процессом свертывания функций, поскольку происходит несоответствие целей экономического пространства и внешней среды объектов недвижимости на отдельной локальной территории. Этап гибели внешней среды со временем переходит в этап становления с появлением новых ресурсов для развития объектов недвижимости, соответствующих новым целям внешней

среды, диктуемых процессами, происходящими в экономическом пространстве.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование позволило проиллюстрировать теорети-

ческие представления пространственно-временной изменчивости внешней среды объектов недвижимости, по средствам выражения ее состояния индикаторами (величинами внешнего (экономического) устаревания объектов недвижимости / прибыли предпринимателя) на территории крупного города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ratterman M. R. *The appraisal of Real Estate*. – 15th Edition, Chicago: Appraisal Institute. 2020. 704 p.
2. Галактионов А. Н. Принципы оценки внешнего экономического износа объектов недвижимости. *Вопросы оценки*. 2005. № 1. С. 46–50.
3. Lee I., & Lee J. A Theory of Economic Obsolescence. *Journal of Industrial Economics*. 2003. № 46, P. 383–401.
4. Longhofer S. D. Land Values and External Obsolescence. *Appraisal Journal*. – March 22, [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thefreelibrary.com/Land+Values+and+External+Obsolescence.-a0670925049> (дата обращения 08.01.2025).
5. Жигулина Т. Н., Мерецкий В. А. Теоретические и практические вопросы определения экономического устаревания для целей массовой (кадастровой) оценки недвижимости затратным подходом. Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сб. матер. II Нац. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. 1. Новосибирск : СГУГиТ, 2019. С. 108–112.
6. Слущкий А. А. Прибыль предпринимателя и предпринимательский стимул. *Вопросы оценки*. 2023. № 3 (111). С. 46–54.
7. Кубраков Д. В. Опыт построения регрессионных моделей внешнего устаревания объектов недвижимости в системе государственной кадастровой оценки. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 1. С. 137–146. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-137-146. EDN DNCKLR.
8. Байковская А. В. Специфика учета влияния факторов внешней среды на объекты незавершенного строительства. *Проблемы экономики и менеджмента*. 2012. № 6 (10). С. 23–27.
9. Корольков Н. Н. Динамическая составляющая при определении внешнего износа (устаревания). *Имущественные отношения в РФ*. 2009. № 2 (89). С. 95–97.
10. Грибовский С. В. К вопросу расчета прибыли предпринимателя при применении затратного подхода к оценке стоимости недвижимости. *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2020. № 6 (225). С. 29–37.
11. Kevin S. Reilly. A Market Perspective: Identifying, Quantifying, and Applying Economic Obsolescence. *THE M&TS JOURNAL*. 2012. Vol. 28. Iss. 2, Spring P. 23–31
12. Озеров Е. С., Пупенцова С. В. Моделирование процесса ценообразования в сделках с коммерческой недвижимостью. *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2015. № 12 (171). С. 29–37.
13. Коланьков С. В. Учет предпринимательской прибыли при оценке рыночной стоимости недвижимости. *Инфраструктура транспорта*. 2022. № 2 (4). С. 21–35.
14. Burada, Cr. & Demetrescu, Tr. Historical Real Estate Valuation by Cost Approach. *Applied Mechanics and Materials*. 2018. Vol. 880. P. 371–376. 10.4028/www.scientific.net/AMM.880.371.
15. Bowes N. E. In Defense of the Cost Approach: A Journey into Commercial Depreciation, Chicago: Appraisal Institute, 2011. 121 p.
16. Ларин Е. Б., Леонтьев А. А., Лопатина Д. И. Определение величины внешнего устаревания на примере Ленинградской области. *Economy and Business*. 2022. Т. 11-1 (93). С. 241–244.
17. Исследование рынка недвижимости. Зонирование городов России [Электронный ресурс]. URL: https://irnr.ru/wp-content/uploads/Концепция/Цены_и_ставки/Зонирование.pdf (дата обращения 08.01.2025).

REFERENCES

1. Ratterman, M. R. (2020) *The appraisal of Real Estate*. 15th Edition. Chicago. Appraisal Institute. 704 p.

2. Galaktionov A. N. (2005) Principles of evaluation of external economic depreciation of real estate objects. *Voprosy ocenki [Valuation Issues]*, 1. 46-50.
3. Lee, I., & Lee, J. A (2003) Theory of Economic Obsolescence. *Journal of Industrial Economics*, 46. 383-401.
4. Longhofer S. D. (2021), Land Values and External Obsolescence. *Appraisal Journal*. March 22, Retrieved from <https://www.thefreelibrary.com/Land+Values+and+External+Obsolescence.-a0670925049> (date of address 08.01.2025).
5. Zhigulina, T. N. & Meretsky, V. A. (2019) Theoretical and practical issues of economic obsolescence determination for the purposes of mass (cadastral) real estate valuation by the cost approach. *Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions: collection of proceedings*, 2.1. 108–112.
6. Slutsky A. A. (2023) Entrepreneur's profit and entrepreneurial incentive. *Voprosy ocenki [Valuation Issues]*, 3 (111). 46-54.
7. Kubrakov, D. V. (2025). Experience in building regression models of external obsolescence of real estate objects in the system of state cadastral valuation. *Vestnik SGUGiT*. Vol. 30, No 1. P. 137–146. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-137-146. – EDN DNCKLR.
8. Baikovskaya, A. V. (2012). Specificity of accounting for the impact of environmental factors on construction in progress. *Problemy jekonomiki i menedzhmenta [Problems of Economics and Management]*, 6 (10). 23-27.
9. Korolkov, N. N. (2009). Dynamic component in determining the external depreciation (obsolescence). *Imushhestvennyye otnosheniya v RF [Property relations in the Russian Federation]*, 2 (89). 95-97.
10. Gribovskiy, S. V. (2020). To the issue of calculating the entrepreneur's profit when applying the cost approach to the assessment of real estate value. *Imushhestvennyye otnosheniya v RF [Property relations in the Russian Federation]*, 6 (225). 29-37.
11. Kevin, S. & Reilly, A (2012). Market Perspective: Identifying, Quantifying, and Applying Economic Obsolescence. *THE M&TS JOURNAL*. Vol. 28. Iss. 2. 23-31
12. Ozerov, E. S. & Pupentsova, S. V. (2015). Modelling of the pricing process in transactions with commercial real estate *Imushhestvennyye otnosheniya v RF [Property relations in the Russian Federation]*, 12 (171). 29–37.
13. Kolankov, S. V. (2022) Accounting of entrepreneurial profit in the assessment of the market value of real estate *Infrastruktura transporta [Transport Infrastructure]*, 2 (4). 21-35.
14. Burada, Cr. & Demetrescu, Tr. (2018). Historical Real Estate Valuation by Cost Approach. *Applied Mechanics and Materials*. 880. 371-376. 10.4028/www.scientific.net/AMM.880.371.
15. Bowes, N. E. (2011). In Defense of the Cost Approach: A Journey into Commercial Depreciation, Chicago: Appraisal Institute, 121 p.
16. Larin, E. B., Leontiev, A. A. & Lopatina D. I. (2022) Determination of the external obsolescence value on the example of the Leningrad region. *Economy and Business*, 11-1 (93). 241–244.
17. Research of the property market. Zoning of Russian cities Retrieved from https://irnr.ru/wp-content/uploads/Концепция/Цены_и_ставки/Зонирование.pdf (date of address 08.01.2025).

Об авторах

Дмитрий Валерьевич Кубраков – начальник отдела государственной кадастровой оценки, аспирант кафедры землеустройства, земельного и городского кадастра.

Татьяна Николаевна Жигулина – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры землеустройства, земельного и городского кадастра

Author details

Dmitry V. Kubrakov – Head of the State Cadastral Valuation Department, PhD Student at the Department of Land Management, Land and Urban Cadastre.

Tatiana N. Zhigulina – PhD, Associate Professor, Department of Land Management, Land and Urban Cadastre.

Получено / Received 17.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.09.2025

Принята к публикации / Accepted 10.11.2025

УДК 332.334.4:630(571.56)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-147-157>

Методика информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда Республики Саха (Якутия)

М. И. Стрекаловская^{1✉}, Н. И. Добротворская²

¹ Арктический государственный агротехнологический университет,
г. Якутск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

e-mail: strekmi16@list.ru ⁵

Аннотация. В статье предлагается совершенствование информационной основы планирования использования земель лесного фонда Республики Саха (Якутия). Актуальность проблемы заключается в нарастающей скорости процессов деформации поверхности земли из-за протаивания вечномёрзлого грунта и образования термокарстов на гаях вследствие повторяющихся лесных пожаров, что в свою очередь ведет к утрате стабильности рельефа участков как важной характеристики для строительства инфраструктурных и иных капитальных объектов. На примере МР «Мегино-Кангаласский улус» изучена динамика площади гарей и получен прогноз деградации вечномёрзлых грунтов. В результате визуального дешифрирования индексов Burned_Area_Detection (BAD), Barren_Soil, Moisture_Index, EVI определены очаги возгорания, установлена площадь, пройденная пожарами, количество накопленной влаги и интенсивность вегетации на гаях по годам. Обоснована формула расчета глубины протаивания грунта в зависимости от среднегодовой суммы осадков и среднего изменения мощности сезонно-талого слоя за год. Предложена технологическая схема методики информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда в условиях повторяющихся катастроф (лесных и природно-ландшафтных пожаров), вызванных техногенными и природными факторами.

Ключевые слова: земли лесного фонда, гари, деградация вечномёрзлого грунта, глубина протаивания грунта, мониторинг земель, информационное обеспечение, территориальное планирование

Для цитирования:

Стрекаловская М. И., Добротворская Н. И. Методика информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда Республики Саха (Якутия). *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 147–157. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-147-157>

Methodology for information support in planning the use of forest fund lands in the Republic of Sakha (Yakutia)

M. I. Strekalovskaya^{1✉}, N. I. Dobrotvorskaya²

¹ Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation,

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation,

e-mail: strekmi16@list.ru

Abstract. The article proposes improvements to the informational framework for planning the use of forest fund lands in the Republic of Sakha (Yakutia). The relevance of this issue arises from the accelerating deformation of land surfaces due to permafrost thawing and thermokarst formation on

burnt-out areas caused by recurrent forest fires, which compromise terrain stability, a key factor for infrastructure and capital construction projects. In the Megino-Kangalassky Ulus municipal district, the dynamics of burnt area extent were analyzed, and permafrost degradation was forecasted. Visual interpretation of indices including burned area detection, barren soil, moisture index, and EVI enabled identification of fire sources, quantification of burnt areas, and assessment of accumulated moisture and vegetation intensity on post-fire sites across years. A formula was derived for estimating soil thaw depth as a function of mean annual precipitation and the average yearly change in seasonally thawed layer thickness. Additionally, a technological scheme is presented for an information-support methodology tailored to planning forest fund land use amid recurrent disasters (forest and landscape fires) driven by anthropogenic and natural factors.

Keywords: forest fund lands, burnt areas, permafrost degradation, soil thaw depth, land monitoring, information support, territorial planning

For citation:

Strekalovskaya M. I., Dobrotvorskaya N. I. (2026). Methodology for information support in planning the use of forest fund lands in the Republic of Sakha (Yakutia). *Vestnik SSUGiТ [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2, pp. 147–157. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-147-157>

Введение

Пожары – это явление, широко распространенное в лесах Республики Саха (Якутия) [1–3]. Лесные пожары отслеживаются по данным спутниковых наблюдений, которые аккумулируются в информационной системе дистанционного мониторинга Рослесхоз (ИСДМ-Рослесхоз). Все оперативные данные по лесным и ландшафтным пожарам на уровне субъектов концентрируются в диспетчерской службе авиационной охраны лесов. Данные оперативного мониторинга пожарной обстановки отражаются в публичной лесной карте федеральной государственной информационной системы лесного комплекса Рослесхоза (ФГИС ЛК), активное использование которой началось с января 2025 г. [4]. Учет последствий лесных пожаров отражается в документах лесопатологического мониторинга и мониторинга воспроизводства лесов, которые содержат сведения об изменениях в лесах. В сведениях о лесотаксационном выделе в ФГИС ЛК отражена информация по видам земель: гарь, насаждения естественного происхождения, лесные культуры, земли для лесовосстановления. Данные таксации лесов Республики Саха (Якутия) датируются началом 1980-х гг. Информация по таксации лесов устарела, а данные лесопатологического мониторинга не позволяют увидеть коренные изменения физического состояния земель, которые мы считаем актуальными. В

сгоревших лесах происходят различные изменения: повышается температура приземного слоя воздуха и почвы, изменяется водный режим почв. Исследователи [1–3, 5–8] фиксируют повышение температурного режима мерзлотных почв на одно-двухлетней гари на 5,5 °С по сравнению с температурой почв в лесу. Это обусловлено снижением отражательной способности с одновременным повышением поглотительной способности участка гари. В результате воздействия совокупности различных факторов изменяется водный режим мерзлотных почв – накопление влаги, приводящее к заболачиванию местности. Под воздействием резкоконтинентального климата (амплитуда колебаний температуры воздуха достигает 100 °С) вода принимает формы жидкости в теплый и льда в холодный сезоны. В результате этого процесса происходят различные криогенные явления, которые зависят от типа местности [8] и это приводит к просадкам и провалам грунта [9]. Цель исследования – изучить изменения состояния почв на гарях в зоне вечной мерзлоты и предложить методике прогноза этих изменений как составную часть методики информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда в Республике Саха (Якутия).

Объектом исследования выступает территория муниципального района (МР) «Мегино-Кангаласский улус», расположенного в Центральной Якутии. Это один из самых густонаселенных улусов республики

(плотность населения 2,81 чел./км²), в улусе 31 сельское поселение. По территории улуса проходит железная дорога до п. Нижний-Бестях, федеральная автомобильная дорога «Колыма», все поселения соединены между собой автомобильными дорогами местного значения, также проложена трубопроводная магистраль газопровода, линии высоковольтных и иных электропередач. Общая площадь улуса составляет 1 173 305 га, из них площадь лесного фонда – 924,6 тыс. га, лесистость – 76,6 % [10] (рис. 1).

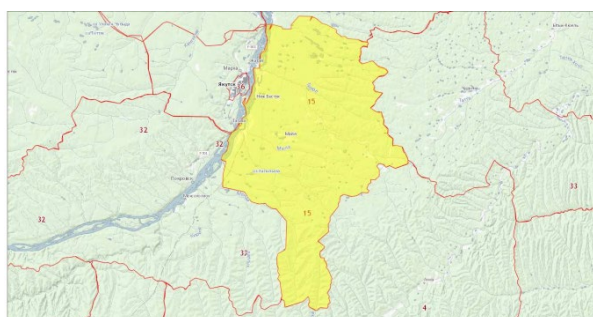


Рис. 1. Границы объекта исследования

Анализ состояния земель МР «Мегино-Кангаласский улус» [11] показал следующие условия (табл.1)

Таблица 1. Природно-физические условия МР «Мегино-Кангаласский улус» [12]

Условия	Характеристика
Рельеф	Центрально-Якутская равнина Термокарстовый рельеф с выраженными аласами
Геологическое строение	Многолетнемерзлые грунты, наличие повторно-жильных льдов до 20 м и более. Сейсмичность 7-8 баллов. Развиты криогенные процессы
Климат	Субарктический (континентальный); среднегодовое количество осадков 200–250 мм, снежный покров в течение 225–250 дней в году с высотой в среднем 20–30 см. Интенсивная солнечная радиация с мая по середину августа
Гидрография	р. Лена, мелководинные речки Суола, Тамма, Мыла, многочисленные термокарстовые озера
Почвы	Мерзлотные: палевые, черноземно-луговые, луговые, дерново-луговые
Растительность	Евразийская хвойно-лесная
Типы местности	Межаласный, низкотеррасовый, песчано-рядовый, склоновый

В качестве основы информационного обеспечения планирования использования земель применялись различные источники. В области разработки схем защиты территорий от воздействия чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера оперативную и достоверную информацию можно получить с помощью мониторинга состояния земель. Известны различные способы получения информации: дистанционные с помощью космических аппаратов, пилотируемой авиации и беспилотных авиационных систем, наземные исследования.

Методы и материалы

Методология исследований определяется стратегией охранного природопользования. Применительно к лесохозяйственным территориям она опирается на многоцелевой подход, включающий в себя не только промышленное использование лесных ресурсов, но и воспроизводство леса как ландшафта в целом с комплексом его условий и функций. Методика исследования гарей на основе дистанционного мониторинга с помощью космических аппаратов более приемлема для наблюдения за обширными лесами РС (Я). В исследовании авторами использован сайт свободного доступа [12] Sentinel Hub, который предоставляет космические снимки аппарата Sentinel-2L2A с пространственным разрешением 20 м. Наблюдения проводились в промежутке с августа 2018 г. по сентябрь 2024 г. при минимальной облачности 10 % в течение пожароопасного и вегетационного периода – с середины мая по конец сентября. Изучены индексы по двум темам «Лесные пожары» и «Растительность и лесное хозяйство». Использованы официальные данные о границах МР «Мегино-Кангаласский улус», мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР 1991 г. масштаба 1 : 2 500 000 [13], атлас сельского хозяйства Якутской АССР 1989 г. [14]. Для идентификации местности использованы результаты натурного и экспериментального лесопатологического мониторинга [15].

Для векторизации космических снимков использовано программное обеспечение QGIS 3.10.

Результаты и обсуждение

В результате визуального дешифрирования индексов Burned_Area_Detection (BAD), Barren_Soil, Moisture_Index, EVI определены

очаги возгорания, установлена площадь, пройденная пожарами; количество накопленной влаги и интенсивность вегетации на гарях по годам (рис. 2).

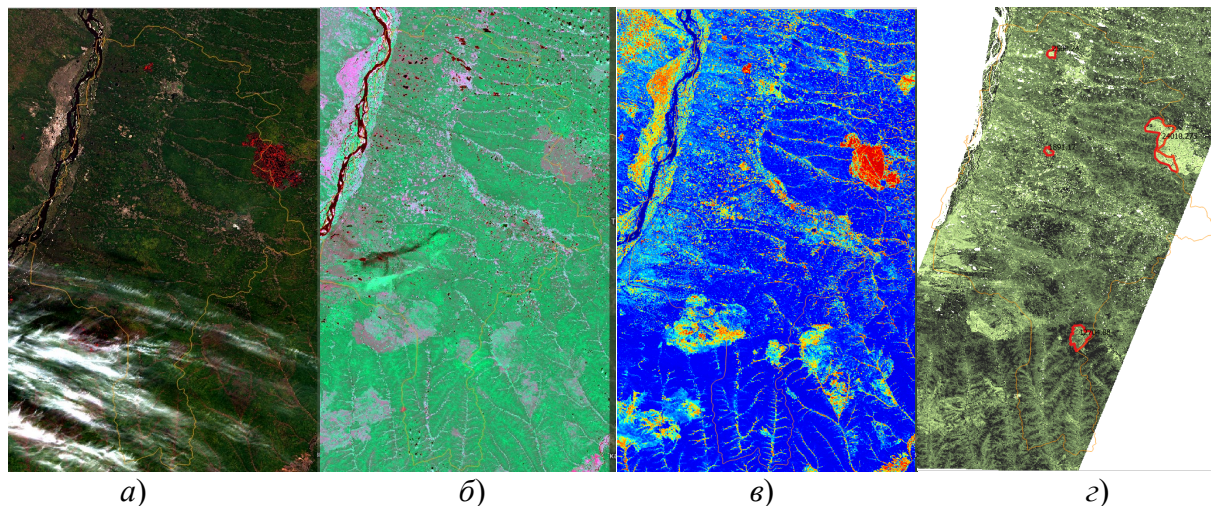


Рис. 2. Мониторинг лесных пожаров и их последствий с использованием визуального дешифрирования индексов: а) BAD, 2021 г.; б) Barren_Soil, 2024 г.; в) Moisture_Index, 2021 г.; з) EVI, 2024 г.

Динамика площади гарей на территории МР «Мегино-Кангаласский улус» показывает ее возрастание по сравнению с предыдущими годами. Источником данных за предыдущие годы послужила аналитическая записка Росреестра [11] (рис. 3).

площадью 41 115,56 га (табл. 2), расположенные в двух типах местности: межлассном и склоновом (рис. 4).

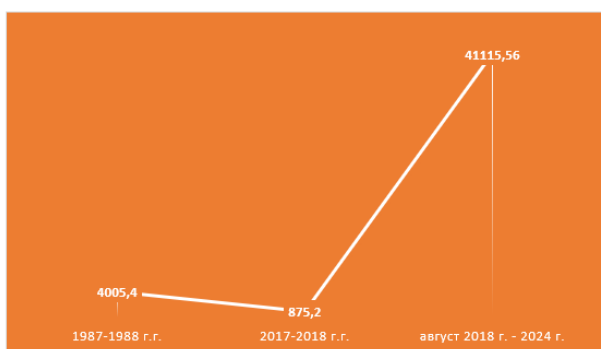


Рис. 3. Динамика площади гарей на территории МР «Мегино-Кангаласский улус»

В результате анализа космических снимков в программе QGIS выявлены гари общей

Таблица 2. Описание гарей

Гарь	Время возникновения пожара, год	Площадь, га	Тип лесного пожара [12]
Гарь-1	2021	24 010, 27	Сплошной интенсивный
Гарь-2	2021	2 509,24	Низовой устойчивый
Гарь -3	2019	12 704,88	Сплошной интенсивный
Гарь-4	Август 2018	1 891,17	Низовой устойчивый

Для межлассного типа местности характерен термокарст – процесс неравномерного проседания почвы и грунта. Для склонового типа местности характерны – криогенный крип, солифлюкция, морозобойное растрескивание, курумы [16].

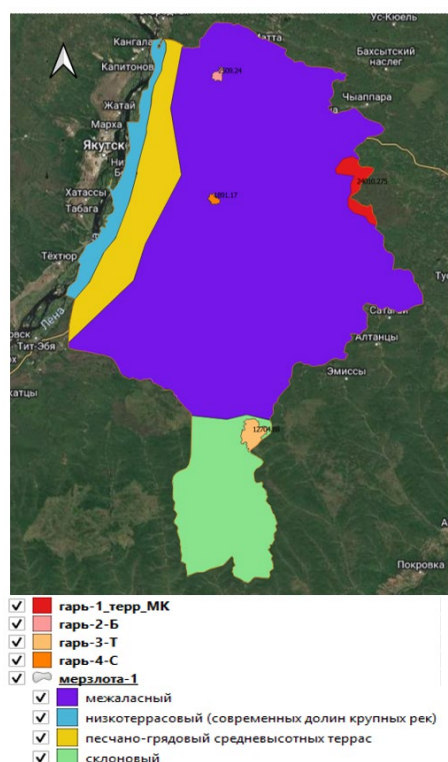


Рис. 4. Тематическая карта «Расположение гарей по типам местности» на территории МР «Мегино-Кангаласский улус»

Исследователи подчеркивают прямую зависимость таяния вечной мерзлоты от следующих факторов: среднегодовой температуры воздуха, среднегодового количества осадков, мощности и плотности снежного покрова [6–8] и др. Все факторы можно сгруппировать на относительно постоянные и изменчивые (табл. 3).

Таблица 3. Природные факторы, влияющие на таяние вечной мерзлоты на территории МР «Мегино-Кангаласский улус»

№	Факторы	Характеристика факторов	Значение
	1	2	3
Относительно постоянные			
1	Географическое положение	координаты	60,7343 °N до 62,4355 °N 129,5156 °E до 131,7897 °E
2	Рельеф	высота над уровнем моря, м	N €[88; 220] [14]
3	Тип ландшафта	среднетаежный мерзлотный, среднетаежный талый, интразональный долинный среднетаежный	L
4	Геологическое строение	многолетнемерзлые породы	G
5	Почвы	мерзлотные таежные палевые почвы, балл бонитета	P = 60 [14]
6	Тип местности	межаласный, низкотеррасовый, песчано-грядовый средневысотных террас и склоновый	A
7	Тип леса	таежный светлохвойный лес	F
Непостоянные факторы			
1	Солнечная радиация	суммарная радиация за год, ккал/см ²	Q € [90; 100] [14]
2	Количество осадков	среднегодовая сумма осадков, мм	S € [200; 220] [14]

Окончание таблицы 3

№	Факторы	Характеристика факторов	Значение
	1	2	3
Непостоянные факторы			
3	Температурный режим воздуха на горях	среднесуточная температура воздуха на горях летом, °С	Твг € [12,1; 24,2] [2]
4	Температурный режим почвы на горях	средняя температура почвы в летний период, °С	Тпг € [15; 17,3] [2]
5	Сомкнутость крон основного древостоя	коэффициент	Дск € [0,1; 0,9] [2]
6	Сгоревшие участки	индекс Burn Area Index	BAI € [-1; 6] [12]
7	Накопленная влага	Moisture Index	Moisture Index € [-1; +1] [12]
8	Сукцессия (наличие растительности)	индекс EVI	EVI € [-1; +1] [12]
9	Тип лесного пожара	низовой, верховой, сплошной	ЛПн ЛПв ЛПс
10	Высота снежного покрова	высота, см	[30; 65] [14]

Если относительно постоянные факторы принять за постоянные величины, тогда в общем виде влияние непостоянных факторов можно представить как функцию множества переменных

$$Y = f(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}), \quad (1)$$

где Y – глубина протаивания вечномерзлого грунта на горях

x_1 – суммарная радиация за год, ккал/см²;

x_2 – среднегодовая сумма осадков, мм;

x_3 – среднесуточная температура воздуха на горях летом, °С;

x_4 – средняя температура почвы на горях в летний период, °С;

x_5 – сомкнутость крон основного древостоя;

x_6 – индекс Burn Area Index;

x_7 – Moisture Index;

x_8 – индекс EVI;

x_9 – тип лесного пожара;

x_{10} – высота снежного покрова, см.

В полученном уравнении переменные $x_2, x_3, x_4, x_7, x_{10}$ в определенной степени являются функцией переменных x_1, x_5, x_6, x_8, x_9 . Для ведения мониторинга состояния гарей важными наблюдаемыми параметрами следует считать количество годовых осадков, температурный режим приземного слоя воздуха на горях и температуру почв гарей, количество накопленной в снеге влаги (плотность и высоту снежного покрова). Чтобы привести переменные к единой единице измерения – метр, необходимо определить соотношение данных по температуре с изменением мощности сезонно-талого слоя (СТС). Как известно, на горях «почва оттаивает глубже на 0,3–0,6 м в июле и 0,4–0,8 м в августе, чем в

лесу» [2, с. 41]. «Наиболее высокая скорость протаивания почвы характерна для молодой гари (10–12 лет)» [2, с. 42]. Изменение температуры воздуха и почвы на +1 °С на свежей гари влечет протаивание почвы на глубину примерно 36,1 см. Эту величину можно принять за x_{11} – среднее изменение мощности сезонно-талого слоя (СТС) (расчеты сделаны по данным 2, С.32–41). По данным [2, с. 32] «приземный слой воздуха на горях был теплее, чем в лесу, на 1,2–1,4 °С в июле, в августе – на 0,6–1,1 °С. Средняя температура почвы на свежих горях выше на 3,1–5,5 °С на глубине 5 см, а на глубине 50 см – на 1,4–1,7 °С, чем под пологом леса» [2, с. 36]. Соотношение изменения температуры воздуха и почвы на горях с мощностью СТС показано в табл. 4.

Таблица 4. Соотношение данных средней температуры почвы на горях на глубине 50 см в летний период с изменением мощности сезонно-талого слоя

Изменение температуры почвы, °С	Среднее изменение мощности сезонно-талого слоя на горях за июль-август (x_{11}), см
1,0	36,10
1,2	43,32
1,4	50,54
1,6	57,76
1,8	64,98
2,0	72,20

В результате уравнение (1) примет следующий вид:

$$Y = f(x_2 + x_7 + x_{10} + x_{11}). \quad (2)$$

Пример расчета глубины протаивания почвы на гари приведен ниже. Например, на гари-1 (2021 г.) следующие данные: изменение средних температур воздуха и почвы на глубине 50 см за +1,4 °С (табл. 5).

Таблица 5. Исходные данные «Гарь-1 (2021 г.)»

Факторы	Единица измерения	Значение
2023 г., двухлетняя гарь		
x_2 – среднегодовая сумма осадков	мм	332 [17]
x_7 – Moisture Index	-	-1
x_{10} – высота снежного покрова	см	34
x_{11} – среднее изменение мощности сезонно-талого слоя (СТС)	см	50,54
Прогноз на 2031 г.		
x_2 – среднегодовая сумма осадков	мм	200 [14]
x_7 – Moisture Index	-	-0,5
x_{10} – высота снежного покрова	см	30 [14]
x_{11} – среднее изменение мощности сезонно-талого слоя (СТС)	см	50,54

Подставив исходные данные табл. 5 в формулу (2), получим:

$$Y = 33,2 - 1 + 34 + 50,54 = 116,74 \text{ см.}$$

Верификация полученного значения – 116,74 см с полевыми данными [2, с. 41, табл. 18] – 107–118 см на свежей двухлетней гари показывает, что полученное значение находится в пределах допустимого. Мощность сезонно-талого слоя на лиственничнике брусничном составляет 30–92 см [2], что в 1,2 раза выше, чем на гари.

Для прогноза на 2031 г. использованы многолетние среднегодовые показатели x_2 и x_{10} 200 мм и 30 см; значение x_7 – 0,5; значение x_{11} неизменно, тогда:

$$Y = 20 - 0,5 + 30 + 50,54 = 100,04 \text{ см.}$$

Таким образом, основное негативное влияние оказывает накопление влаги на участках гари, которое ведет к повышению мощности СТС и, следовательно, к деградации вечномерзлых грунтов. Деградация вечномерзлых грунтов – процесс медленный, не проявляющийся моментально, но влекущий за собой необратимые изменения рельефа местности – образование термокарстовых озерных котловин – аласов (рис. 5).



Рис. 5 Фрагменты аласа «Тюнгюлю» (фото авторов)

На основе проведенного исследования установлена необходимость учета границ гарей сплошных лесных пожаров в зоне вечной мерзлоты в документах территориального планирования (рис. 6).

Данные о лесах аккумулируются в ФГИС ЛК, в том числе таксационная характеристика выделов, где есть информация о виде земель: гарь, естественные насаждения и др. Как отмечено выше, таксационные материалы зачастую не содержат актуальную информацию по разным причинам. Поэтому предлагаем передавать и вносить актуальные сведения по лесным пожарам и гарям по результатам кос-

мического мониторинга лесов в ФГИС ЛК. Лесопатологическое обследование участка гари устанавливает степень повреждения корневых лап основного древостоя, выявляет несоответствие таксационным описаниям, составляется ведомость перечета деревьев, назначаются мероприятия, способствующие возобновлению лесной растительности. Государственный фоновый и локальный мониторинг многолетней (вечной) мерзлоты выявляет деградацию вечномерзлых грунтов, анализирует, оценивает и прогнозирует состояние грунта.

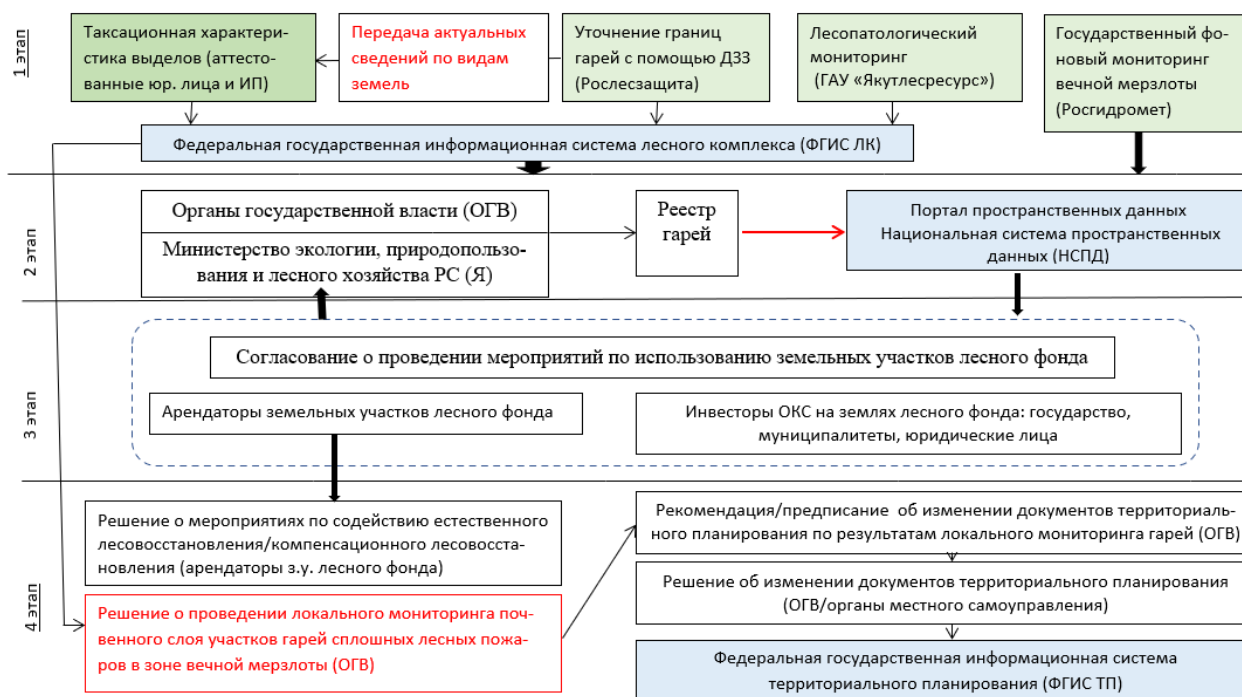


Рис. 6. Технологическая схема методики информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда в условиях повторяющихся техногенных и природных катастроф (красным шрифтом и стрелкой отмечены предложения авторов)

Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства РС (Я) (далее – Министерство) составляет реестр гарей, который размещается на официальном сайте. Арендаторы земельных участков лесного фонда обязаны проводить лесовосстановительные работы [Лесной Кодекс РФ от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 30.12.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025), ст.70.1. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/. – Текст: электронный], участки лесовосстановления выбирают из предложенного на сайте

реестра. Мы предлагаем размещать реестр гарей в Национальной системе пространственных данных (НСПД) для большей информативности и наглядности представленных данных, которые можно будет синхронизировать с другими данными портала. На данный момент реестр гарей составляется без учета процессов, связанных с деградацией вечной мерзлоты. Предлагаем Министерству проводить локальный мониторинг почвенного слоя гарей сплошных лесных пожаров, так как наибольшие изменения температуры почвы происходят при сплошной гибели лесной рас-

тельности, что приводит к заболачиванию, просадкам и провалам грунта (см. табл. 5). Данные локального мониторинга позволят выявить приоритетные участки гарей для лесовосстановления. Кроме того, по данным локального мониторинга можно сделать аргументированные рекомендации или предписания для внесения изменений в документы территориального планирования органами государственной власти и органами местного самоуправления. Внесенные изменения документов территориального планирования будут учитывать необратимые длительные процессы деградации вечной мерзлоты для снижения риска материально-финансовых потерь при размещении линейных и площадных объектов капитального строительства на землях лесного фонда РС (Я).

Заключение

Для информационного обеспечения устойчивости территории для целей строи-

тельства необходима более совершенная информация в сфере использования лесных земель, изменивших свой физический статус вследствие пожаров на вечной мерзлоте, в частности температурный и водный режим. В результате визуального дешифрирования индексов определяются очаги возгорания и площадь лесов, пройденная пожарами, физическое состояние которых изменено. Это необходимо учесть в технологической схеме методики информационного обеспечения планирования использования земель лесного фонда.

На основе вышесказанного предложено вести учет и регистрацию границ гарей в зоне вечной мерзлоты. В схемах территориального планирования необходимо учитывать гари на межселенных территориях ввиду возможной потери стабильности форм поверхности таких участков как базиса для строительства инфраструктурных и иных капитальных объектов, а также в планах по реконструкции существующих инфраструктурных и иных объектов капитального строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исаев А. П. Естественная и антропогенная динамика лиственных лесов криолитозоны (на примере Якутии) : автореферат дис. ... докт. биол. наук. Якутск. 2011. 51 с.
2. Лыткина Л. П. Лесовосстановление на горях Лено-Амгинского междуречья: Центральная Якутия. Новосибирск : Наука, 2010. 118 с.
3. Лыткина Л. П., Протопопова В. В. Лесные пожары как экологический фактор формирования лесов Центральной Якутии. Наука и образование. 2006. № 2. С. 50–56.
4. Федеральная государственная информационная система лесного комплекса (ФГИС ЛК). Официальный сайт. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/information-systems/fgis-lk-information/acts/>.
5. Вечная мерзлота, леса и лесные пожары: непримиримые антагонисты? URL: <https://goarctic.ru/priroda/vechnaya-merzlota-lesa-i-lesnye-pozhary-nepirimimye-antagonisty/>.
6. Гаврилова М. К. Тепловой баланс лиственного леса на Лено-Амгинском междуречье. Гидроклиматические исследования в лесах Сибири. М. : Наука, 1967. С. 28–52.
7. Гаврилова М. К. Радиационный режим в лиственных лесах юго-западной Якутии. Лесоведение. 1969. № 1. С. 16–23.
8. Самсонова В. В. Влияние леса на вечную мерзлоту. Мониторинг и методы исследования. Якутск : Якутский госуниверситет, 2001. 40 с.
9. Holloway J. E., Lewkowicz A. G., Douglas T. A., et al. Impact of wildfire on permafrost landscapes: A review of recent advances and future prospects. Permafrost and Periglacial Processes. 2020;1–12. <https://doi.org/10.1002/ppp.204812> HOLLOWAY ET AL.
10. Статистический ежегодник РС (Я): Стат. сб./Саха (Якутия) стат. Якутск, 2024. 508 с. URL: <https://14.rosstat.gov.ru>.
11. Информация о результатах государственного мониторинга земель (аналитическая записка). Росреестр. 2018 г. URL: <https://rosreestr.gov.ru/>.
12. Sentinel Hub. Официальный сайт. - URL: Sentinel Hub/.
13. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР масштаба 1 : 25 000 000. Госгеодезия СССР, 1991.

14. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. Москва : Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР. 1989.
15. Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия). Официальный сайт. – URL: <https://minpriroda.sakha.gov.ru/>.
16. Новопроезжая В. А., Федоров А. Н. Изменения геокриологических условий межгаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2025. Т. 30. № 1. С.73–84. URL: [Изменение геокриологических условий межгаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата/](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2025.30.1.73-84).
17. Погода. Климат. Официальный сайт. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/24768_2.htm/.

REFERENCES

1. Isaev, A.P. (2011). *Natural and anthropogenic dynamics of larch forests of the cryolithozone (on the example of Yakutia)*: Abstract of the dissertation. ... Doctor of Biological Sciences. Yakutsk [in Russian].
2. Lytkina, L.P. (2010). *Reforestation in burnt areas of the Lena-Amga interfluve: Central Yakutia. [Reforestation on the fires of the Lena-Amga interfluve: Central Yakutia]*. Novosibirsk, Nauka Publ [in Russian].
3. Lytkina, L.P., Protopopova, V.V. (2006). Forest fires as an ecological factor in the formation of forests in Central Yakutia. *Nauka i obrazovaniye [Science and Education]*, 2, 50-56 [in Russian].
4. Federal State Information System of the Forest Complex (FGIS LC). Retrieved from <https://rosleshoz.gov.ru/information-systems/fgis-lk-information/acts/>. [in Russian].
5. Permafrost, forests and forest fires: irreconcilable antagonists? Retrieved from <https://goarctic.ru/priroda/vechnaya-merzlota-lesa-i-lesnye-pozhary-nepirimirime-antagonisty/>.
6. Gavrilova, M. K. (1967). *Teplovoy balans listvennichnogo lesa na Leno-Amginskom mezhdurech'ye. Gidoklimaticheskiye issledovaniya v lesakh Sibiri [The thermal balance of the larch forest in the Lena-Amginsky interfluve. Hydroclimatic studies in the forests of Siberia]*. Moscow: Nauka, 28-52 [in Russian].
7. Gavrilova, M. K. (1969). Radiation regime in the larch forests of southwestern Yakutia. *Lesovedeniye. [Forestry science]*, 1, 16-23 [in Russian].
8. Samsonova, V.V. (2001). *Vliyaniye lesa na vechnuyu merzlotu. Monitoring i metody issledovaniya. [The influence of forests on permafrost. Monitoring and research methods]*. Yakutsk: Yakutsk State University [in Russian].
9. Holloway JE, Lewkowicz AG, Douglas TA, et al. Impact of wildfire on permafrost landscapes: *A review of recent advances and future prospects. Permafrost and Periglacial Process*. 2020;1–12. <https://doi.org/10.1002/ppp.204812> HOLLOWAY ET AL.
10. Statistical Yearbook of the RS (Ya): Statistical collection/Sakha (Yakutia)stat. 2024 Retrieved from <https://14.rosstat.gov.ru>.
11. Information on the results of state land monitoring (analytical note). *Rosreestr. 2018* Retrieved from [https://rosreestr.gov.ru /](https://rosreestr.gov.ru/).
12. Sentinel Hub. Retrieved from Sentinel Hub/.
13. Permafrost landscape map of the Yakut ASSR scale 1:25000000 (1991). – State geodesy of the USSR [in Russian].
14. Atlas of agriculture of the Yakut ASSR (1989). – Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR[in Russian].
15. Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). Retrieved from <https://minpriroda.sakha.gov.ru/>.
16. Novopriozhdaya, V.A., Fedorov, A.N. (2025). Changes in the geocryological conditions of the inter-glacial regions of Central Yakutia with predicted climate warming. *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarkтики [Natural resources of the Arctic and Subarctic]*. 1 (30), 73-84 [in Russian].

17. The weather. Climate. Official website http://www.pogodaiklimat.ru/history/24768_2.htm/. [in Russian].

Об авторах

Мария Ильинична Стрекаловская – аспирант кафедры кадастра и территориального планирования, старший преподаватель кафедры землеустройства и ландшафтной архитектуры.

Надежда Ивановна Добротворская – доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры кадастра и территориального планирования.

Author details

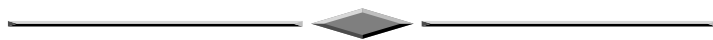
Maria I. Strekalovskaya – PhD student, Department of Cadastre and Territorial Planning; Senior Lecturer, Department of Land Management and Landscape Architecture.

Nadezhda I. Dobrotvorskaya – D.Sc., Senior Researcher, Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning.

Получено / Received 04.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.10.2025

Принята к публикации / Accepted 17.12.2025



УДК 001.8:528.4(5-015

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-158-168>

Советско-германская экспедиция на Памир 1928 г.: топографо-геодезические задачи и достижения

Д. И. Муренко^{1✉}

¹Новосибирский государственный университет экономики и управления,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: denismurenko@yandex.ru

Аннотация. В статье анализируется методология организации советско-германской Памирской экспедиции 1928 г. Описываются состав и распределение ролей среди участников экспедиции (инженеры-геодезисты, фотограмметристы, топографы, метеорологи), а также система работы на больших высотах. Рассмотрены применённые полевые методы: создание геодезической опорной сети триангуляцией, точные базисные измерения, астрономические азимуты и высоты для первичной привязки, учёт температурных и атмосферных поправок для высокогорных наблюдений. Акцентируется внимание на обмене опытом между советскими и немецкими специалистами, в частности, на освоении советскими геодезистами фотограмметрического метода съёмки. В заключение показано, как методологические решения экспедиции обеспечили коррекцию прежних картографических представлений о Западном Памире и способствовали профессиональному росту советских участников через усвоение новых геодезических и картографических технологий.

Ключевые слова: памирские экспедиции, топографо-геодезические и картографические исследования, альпинистская подготовка инженерно-технических кадров, Академия наук СССР, фотограмметрия

Для цитирования:

Муренко Д. И. Советско-германская экспедиция на Памир 1928 г.: топографо-геодезические задачи и достижения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 158–168. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-158-168>

The Soviet-German Pamir Expedition of 1928: topographic and geodetic objectives and accomplishments

D. I. Murenko^{1✉}

¹Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: denismurenko@yandex.ru

Abstract. The paper examines the organizational methodology of the 1928 Soviet-German Pamir Expedition. It delineates the expedition's personnel structure and role allocation among geodetic engineers, photogrammetrists, topographers, and meteorologists, as well as the operational system

for working at high altitudes. Key field techniques are scrutinized: geodetic control network establishment by using triangulation method, high-precision baseline measurements, astronomical determinations of azimuth and elevation for primary georeferencing, and adjustments for thermal and barometric influences in alpine observations. Special attention is devoted to the knowledge exchange between Soviet and German experts, particularly the Soviet geodesists' mastery of photogrammetric surveying. Ultimately, the expedition's methodological innovations rectified longstanding cartographic misconceptions of the Western Pamirs and advanced Soviet expertise via integration of novel geodetic and cartographic technologies.

Key words: Pamir expeditions, topographic-geodetic and cartographic research, mountaineering training of engineering staff, Academy of Sciences of the USSR, photogrammetry

For citation:

Murenko D. I. (2026). The Soviet-German Pamir Expedition of 1928: topographic and geodetic objectives and accomplishments. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 158–168. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-158-168>

Введение

Российско-германские научные обмены всегда играли определенную роль в развитии отечественной науки, обогащая ее новыми идеями, технологиями и подходами. Однако эти связи никогда не были лишены влияния политической конъюнктуры. Последнее столетие в истории российско-германских научных связей отмечено двумя яркими периодами расцвета, сменившимися упадком, что демонстрирует их циклический характер и зависимость от внешних факторов. Наиболее отчетливо эти тенденции проявились в 1920-е – начале 1930-х гг., когда после Первой мировой войны и в условиях политической изоляции обеих стран научное сотрудничество стало важным каналом обмена знаниями и технологиями. Интересным в этом плане представляется изучение опыта организации советско-германской научной экспедиции на Памир 1928 г. В то время СССР значительно отставал от Германии в области топографии, картографии и геодезии. Немцы располагали более современным оборудованием и технологиями в области фотограмметрии, Советский Союз же обладал огромной территорией с разнообразными климатическими и природными зонами, что делало его привлекательным для германских ученых. Изучение истории применения наземной фотограмметрии актуально и в наше время. Наземная фототеодолитная съемка до сих пор применя-

ется для контроля точности строительных и инженерных конструкций, для детального обмера архитектурных объектов, зданий и исторических памятников, а также для мониторинга деформаций сооружений.

Методология исследования

В основе исследования лежит комплексный методологический подход. Использовались методы источниковедения для работы с архивными документами, научными отчетами и картографическими материалами, что обеспечило реконструкцию топографо-геодезических работ. Сравнительно-исторический анализ применялся для выявления особенностей организации и проведения экспедиции, а также для оценки вклада советских и немецких специалистов в изучение Памира. Метод исторической реконструкции позволил воссоздать картину экспедиции и её методологическое значение для развития науки. Цель статьи – реконструировать топографо-геодезические, картографические и организационные практики экспедиции через системный критический анализ источников. Источниковой базой исследования послужили официальные отчеты экспедиции и воспоминания ее участников.

К истории проблемы

В 1920-е гг. в условиях напряженных отношений с Францией и особенно Англией, а

также отсутствия дипломатических отношений с США, для СССР Германия была наиболее близким внешнеполитическим партнером. Для Веймарской республики же разыгрывание «русской карты» было одним из факторов давления на западных партнеров с целью получения определенных уступок. Именно на вторую половину 1920-х гг., период в целом благоприятного развития внешнеполитических отношений двух стран, приходится и всплеск активности научных контактов. Переломным в этом отношении следует считать 1925 г. и празднование 200-летия Академии наук СССР, с которого берет начало история более тесного германо-советского научного сближения. Юбилей вылился в грандиозный праздник, небывалый в истории академии по своему размаху и торжественности.

В ходе торжеств начались переговоры об упрочнении научных связей между Советским Союзом и Германией, которые велись председателем ЦИК СССР М. И. Калининым, народным комиссаром просвещения А. В. Луначарским, ученым-химиком, ректором Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана Н. П. Горбуновым. Президент Объединения для помощи немецкой науке Ф. Шмидт-Отт предложил, чтобы германо-советское сотрудничество развивалось в области совместных экспедиций. Во время беседы директора Прусского метеорологического института, профессора Х. фон Фиккера с Н. П. Горбуновым родилась идея совместной Памирской экспедиции [1, с. 142–143].

Лично для Х. Фиккера идея организации такой экспедиции была неслучайной. В 1913 г. он вместе с профессором географом В. Рикмерсом возглавлял большую экспедицию на Памир, организованную Германским и Австрийским альпинистским обществом. Памир давно привлекал внимание немецких ученых, особенно его западная окраина, выделявшаяся своими большими высотами. Посещение этого района было сопряжено с большими расходами. Германские ученые и альпинисты стремились использовать на Памире опыт работы в Альпах. Полученные ими новые выводы должны были дать толчок дальнейшим исследованиям Альп. Памир да-

вал возможность испытания нового для того времени фотограмметрического метода, который для определения пространственного расположения объектов на местности использовал фотографирование. Предполагалось затем расширить проверку метода и основанных на нем инструментов, но мировая война, революция и гражданская война надолго закрыли эту возможность. Теперь же у немецкой стороны появилась возможность продолжить начатые исследования.

Советских ученых привлекала перспектива исследований, открывающих путь к пониманию природы мощного узла горных систем, включающего Гималаи, Тянь-Шань, Гиндукуш, Куэнь-Лунь, нанесение на карту большого района Памира, бывшего до тех пор «белым пятном», получение новых данных для геологии, минералогии, метеорологии, гляциологии, ботаники, зоологии, этнографии, лингвистики. В намеченном к изучению районе брали начало многие реки, с режимом которых были связаны перспективы развития сельского хозяйства и энергетики Таджикистана. Все эти проблемы соответствовали задачам Академии наук, которая именно в это время приступила к планомерному изучению природных богатств союзных и автономных республик.

Организация экспедиции

Вскоре после академических торжеств в Германии образовалась инициативная группа, в которую вошли главные участники экспедиции 1913 г. Группа нашла поддержку в лице Общества помощи германской науки. В октябре 1925 г. последовал визит Н. П. Горбунова в Берлин, где он встретился с Ф. Шмидтом-Оттом, официально предложив германским ученым принять участие в исследовании Средней Азии. Шмидт-Отт провел совещание с берлинскими учеными, на котором было решено установить еще более тесные контакты с Академией наук СССР. 28 июня 1926 г. в Берлине состоялась встреча немецкой группы с представителями Академии наук СССР, на которой обсуждался разработанный Х. Фиккером уже более конкретный план экспедиции. К ее организации при-

ступили лишь в 1927 г. после получения согласия советского правительства.

Главными задачами экспедиции должны были явиться: исследование центральной части Заалайского хребта, сопровождаемое попыткой взойти на пик Ленина; исследование гребня Зулум-арт, ответвляющегося от пика Ленина в южном направлении, и, если позволит время, изучение области, лежащей к юго-западу от пика Ленина, где, по предположению германских исследователей, находился громадный меридиональный гребень Сель-тау, частично ими сфотографированный в 1913 г. В основу этих общегеографических исследований должны были лечь картографические работы. Существенную помощь этим работам должны были оказать альпинисты, на которых возлагалась предварительная рекогносцировка ледников, перевалов и восхождения на наиболее высокие вершины. По первоначальному плану в состав Экспедиции должны были входить 5 советских и 5 германских ученых, а также 5 германских альпинистов. В дальнейшем состав советской части экспедиции был значительно увеличен, поскольку были поставлены еще некоторые дополнительные задачи, к которым относились биологические опыты.

Руководителем советской группы был назначен Н. П. Горбунов, его заместителем – геолог и геохимик, будущий академик АН СССР Д. И. Щербаков. В группу также вошли: проф. Среднеазиатского государственного университета Н. Л. Корженевский, астроном Пулковской обсерватории Я. И. Беляев, метеоролог Р. Р. Циммерман, топограф И. Г. Дорофеев, военный инженер-геодезист К. В. Исаков и др. Помимо задач, намеченных в плане экспедиции, группа взяла на себя еще дополнительные исследования: изучение аэрологических условий для целей авиации и выяснение возможностей местной и дальней радиосвязи на длинных и коротких волнах в горных условиях. Поэтому в нее вошли радиотехники и магнитолог. На метеостанциях работали четыре студента Среднеазиатского университета. В июле-августе (на время своего отпуска) к экспедиции присоединились в качестве альпинистов Н. П. Горбунов, прокурор РСФСР Н. В. Крыленко, его жена,

член коллегии Рабкрина Е. Ф. Розминович, математик О. Ю. Шмидт, врач Е. М. Россельс.

Германскую группу возглавил В. Рикмерс. Также в нее вошли: мюнхенский геодезист доктор Р. Финстервальдер, имевший большой экспедиционный опыт работы в Гималаях, его ассистент доктор Г. Бирзак, геолог доктор Л. Нот, зоолог доктор В. Рейниг, лингвист Прусской академии наук доктор В. Ленц. Почти все они были к тому же опытными альпинистами. В группу вошли также четыре первоклассных альпиниста: доктор Ф. Борхес, доктор Е. Альвейн, студенты К. Вин и Е. Шнейдер. В Германии объявилось много желающих поехать в экспедицию за свой счет, но из них был принят только один – врач Ф. Кольхаупт, поскольку он был хорошим альпинистом. Всего в экспедиции участвовало 107 человек, не считая временных носильщиков.

В мае 1928 г. в Москве на совместном совещании советской и германской групп был намечен окончательный план работы экспедиции. Советская группа предложила перенести центр тяжести работ на изучение так называемой «Неисследованной области», в пределах которой находился предполагаемый хребет Сель-тау, отделяющий Памирское нагорье от верховьев рек Язгулем, Ванч и Гармо. Такое изменение первоначального плана было вызвано желанием исследовать наиболее интересные в географическом отношении верховья рек Сель-сай, Танымас, Язгулем и Ванч. Согласно воспоминаниям Е. М. Россельса, некоторые цели экспедиции были связаны, в том числе, и с сакральными знаниями: «Основной задачей экспедиции являлась составление точной географической карты и обследование „белого пятна“, которое и занимает значительную часть намеченной области и вокруг которого местные жители сложили множество легенд о том, что в недостижимых ущельях Танымаса живет какое-то таинственное племя, которое бережно охраняет подступы к своим владениям. Легенды говорят, что много-много лет назад какое-то древнее племя, спасаясь бегством от своих поработителей, ушло через таинственные перевалы Кашал-Аяк и Танымас и пропало без вести» [2, с. 8]. Немецких альпинистов также интересовала эта легенда. Альпи-

нист Ф. Борхес отмечал: «Местные жители якобы пользовались этими перевалами в древние времена, однако теперь либо больше не ходили через них, либо, по меньшей мере, сохраняли их в секрете. Выяснение этого было нам поручено Обществом Взаимопомощи Немецкой Науки в качестве одного из наиболее важных экспедиционных заданий» [3].

В силу того, что намеченная область была почти совершенно не исследована, основной задачей экспедиции являлось составление ее географической карты, сопровождаемой общим описанием. Поэтому был создан сильный топографический и геодезический сектор экспедиции, снабженный новейшими германскими приборами. Часть оборудования предоставили Академия наук, Главная геофизическая обсерватория, среднеазиатские научные учреждения, Управление военно-воздушных сил Рабоче-Крестьянской Красной Армии. Много инструментов В. Рикмерс приобрел в Германии. По словам И. Г. Дорофеева, большую часть снаряжения для всех членов экспедиции привезли с собой немцы: специальные альпинистские ботинки со стальными шипами, ледорубы, веревки, по паре шестизубых кошек, костюмы из прочной материи, штурмовые костюмы из тонкого ветронепроницаемого брезента, дымчатые очки, теплые перчатки, носки и парусиновые рукавицы [4, с. 15]. Финансирование экспедиции осуществлялось на паритетных началах. По словам Д. И. Щербакова, экспедиция обошлась в 150 000 руб., не считая средств на обработку собранных материалов, длившуюся несколько лет [5, с. 202].

Для общего описания изучаемых районов Н. Л. Корженевский и В. Рикмерс должны были обобщить материалы, собираемые Финстервальдером, Дорофеевым, Горбуновым и другими исследователями по их маршрутам. Для составления карты было решено применить метод стереофотограмметрической съемки, дополнив его устаревшей на тот момент мензульной съемкой и более точным определением высот новейшим угломерным инструментом – теодолитом Вильда. Определение опорных точек для фотограмметрических работ – астрономических пунктов – поручалось астроному Я. И. Беляеву. Беляев

также измерял земной магнетизм в разных точках маршрутов, пользуясь солнечными часами-деклинаторами собственной конструкции. Фотограмметрический метод, тогда еще новый, наиболее объективно и полно передавал рельеф местности в труднодоступных горных районах. Этот метод обеспечивал возможность нанесения на карту не только горизонталей, но и любых деталей, интересных специалисту, к тому же позволял перенести центр тяжести съемки на кабинетную обработку. Работать с теодолитом было непросто, так как необходимо было подниматься на самые высокие точки, а это было под силу только первоклассным альпинистам.

Единственными, кто в группе владел технологией фотограмметрической съемки, были германские геодезисты Р. Финстервальдер и Г. Бирсак. Они были снабжены аппаратами двух типов: легким полевым фототеодолитом фирмы Цейсс и малым теодолитом, специально сделанным для экспедиции [6, с. 7]. Топограф И. Г. Дорофеев же с мензулой облегченного типа, буссолью Шмалькальдера и анероидом-высотомером должен был пройти «мертвые пространства», недоступные для фотограмметрической съемки. Маршрутную съемку по рекам Бартангу и Язгулему взял на себя Горбунов. Хронометры проверяла немецкая коротковолновая станция. Также некоторый опыт фототеодолитной съемки имел К. В. Исаков.

Осуществление мероприятия

Отъезд немецкой группы из Штеттина был назначен на 11 мая 1928 г. когда накануне путешественники впервые собрались вместе в Берлине. Президент Объединения для помощи немецкой науке Ф. Шмидт-Отт устроил им прощальный вечер, куда пришел и советский полпред в Германии И. Н. Крестинский, который много помогал в подготовке экспедиции. 14 мая пароход с исследователями и 243 ящиками их грузов пришел в Ленинград. 22 мая группа выехала в Ташкент, где несколько дней ушло на подбор помощников, наем лошадей. Помогали местный университет, Физический и Метеорологический институты, военное командование. В Оше, лежа-

щем в дальнем конце плодородной Ферганской долины напротив Алайских гор, был большой сборный пункт экспедиции. Вот как запомнил ошский лагерь И. Г. Дорофеев: «Большой двор школы, отведенной экспедиции, казался каким-то базаром: кругом ящики, чемоданы, корзины и масса людей. Шум стоял, как во встревоженном улье. Говорили на четырех языках: русском, немецком, узбекском и киргизском; плохо понимая друг друга, старались криком заполнить пробел в знании языка своего слушателя» [7, с. 51].

Из Ош первым выступил 12 июня проф. Н. Л. Корженевский вместе с Л. Нотом. Остальные выдвинулись 19 июня, по Большой памирской дороге спустившись в Алайскую долину. Здесь на берегу р. Кзил-су, против урочища Сары-таш, была устроена 1-я база экспедиции. Именно здесь немецкие геодезисты начали создавать свою первую триангуляционную сеть. Профессор Р. Финстервальдер и его ассистент Г. Бирсак провели в Алайской долине подготовительную триангуляцию, необходимую для фотограмметрической съемки Заалайского хребта. Опорным пунктом этой съемки была вершина Кара-тепе (3 858 м), на которой еще имелся старый триангуляционный знак. Также была произведена фотосъемка горного массива Кзил-агын, с какой целью заложены три базисные линии. Сразу с нескольких позиций пришлось производить фотосъемку оз. Каракуль: с горы на северном берегу (от триангуляционной вышки на высоте 4 700 м), с Восточных гор (4 400 м) и с южного полуострова (4 300 м). Так как отдельные объекты съемки находились на расстоянии до 40 км, пришлось заложить базисные линии до 4 км длины. Конечной целью этих работ стал план озера в масштабе 1 : 200 000 [6, с. 39].

Всего за время почти четырёхмесячных работ было заложено и тригонометрически измерено 130 базисных линий, из них около 15 – при съемке Кзил-агына и Кара-куля; 35 – для долины р. Танымас и ледника Муз-кулак; 35 – для ледника Федченко; 5 линий – для Баянд-киикских на склонах и гребне Алайского хребта для съемки Заалайского хребта. При последней съемке была заложена наиболее длинная базисная линия, длиной в 5 км

(обычные базисы брались в 1,5–2 км), а объект съемки был удален на 40–60 км. Съемка Заалайского хребта имела целью составление схематической карты гребней и долин без горизонталей, или так называемую орографическую карту в масштабе 1 : 250 000. Наиболее высокая базисная линия была заложена на высоте 5 900 м. Наиболее высокое рекогносцировочное восхождение сделано 12–13 сентября на вершины, лежащие против пер. Кашал-аяк с восточной стороны ледника, до высоты в 6 000 м. Большинство снимков – конвергентные или отклонённые. Почти вся съемка проводилась большим фототеодолитом.

Для фототеодолитной съемки Р. Финстервальдеру и Г. Бирсаку пришлось сделать более 50 восхождений, из них 30 на вершины выше 5 000 и один раз на вершину в 6 000 м. Вся работа была выполнена ими почти исключительно собственными силами при ограниченном числе носильщиков, а иногда и без них. Большое затруднение для работ представляли разреженность воздуха и холод. На высотах около 5 000 м температура обычно держалась между 0 – -10 при значительном ветре. Зато успеху съемки помогала значительная прозрачность воздуха, благодаря которой возможно было обрабатывать на стереоавтографе детали фотоснимка, сделанного на расстоянии до 60 км.

Германскими геодезистами был собран полный материал для составления карты всего ледника Федченко и его боковых ветвей в масштабе 1 : 25 000. Эта съемка была обработана для издания карты ледника, имеющего длину свыше 75 км, в масштабе 1 : 50 000 или 1 : 75 000. В этом же масштабе была сделана карта долины р. Танымас от урочища Кокджар до ледника Федченко и ледника Нотгемейгшафт, в 40 км длиной. Общая площадь этой детальной съемки приблизительно равнялась 1 500 кв. км. Германскими геодезистами был собран материал для составления орографической карты (карты гребней и долин) Заалайского хребта на протяжении от Бор-добы до пер. Терс-агар, горной группы Сель-тау и примыкающей к ней части Памирского плато к Западу от озера Кара-куль, в масштабе 1 : 250 000. Съёмка охватила площадь в 15 000 кв. км. Собран материал для составле-

ния карты оз. Кара-куль в масштабе 1 : 200 000. Детально заснят ледниковый язык ледника Нотгемейнштафт с целью последующего исследования его изменений и движения.

Работы Р. Финстервальдера и Г. Бирсака имели важное методологическое значение. Они доказали, что фотограмметрическая съемка облегченного типа может быть с успехом применена в горных экспедициях для разрешения общегеографических вопросов (орография, гидрография) и для специальных целей (изучение морфологии, гляциологии). С более узкой точки зрения интересов методики топографии и геодезии, работа германских фотограмметристов явилась примером удачного применения фототеодолита. Данный метод был наиболее удачен при съемке точных, подробных карт как в сильно расчленённой высокогорной области, так и на горном плато с менее резким рельефом, при рекогносцировочных съемках больших горных пространств на дальних расстояниях, при съемках, производимых людьми без специального геодезического и топографического образования, для точного измерения движения и таяния ледников.

Обработка материалов фототеодолитной съемки производилась в фотограмметрическом кабинете Мюнхенского высшего технического училища на стереоавтографе Цейса. В этих работах приняли также участие, в целях изучения фотограмметрического метода, топограф И. Г. Дорофеев и инженер-геодезист К. В. Исаков.

В ходе экспедиции Советские геодезисты и топографы также проделали большую работу по изучению Памира. Всего топографом И. Г. Дорофеевым было пройдено по линейному расстоянию свыше 700 км с инструментальной (мензольной) и полуинструментальной съемками, а заснятая площадь составила несколько тысяч квадратных километров совершенно необследованных районов. Как видно из воспоминаний И. Г. Дорофеева, работать приходилось в непростых условиях: «Около 11 часов дня поднялся сильный, холодный ветер. Мензула дрожит под напором ветра. Стараемся укрыться зонтом. Зябнут руки, плохо владеешь карандашом. Спрячься от ветра, пригреет Солнце – стано-

вится жарко. К вечеру еще холоднее стало. Шуба не может согреть. Чувствую, что голову продувает как-то особенно, а теплой шапки не было. Места стоянки приходится выбирать все повыше, с большим кругозором, чтобы побольше заснять, а ветер здесь так и рвет» [7, с. 55]. «При работе на мензуре прочерчивать направления не представляет труда, это делается в течение секунд, а буссолью брать направления трудно и долго; надо придерживать дыхание, чтобы не дрожали руки, – это мешает успокоению магнитной стрелки. А легко ли задерживать дыхание на большой высоте, если и без того кислорода в легкие попадает недостаточно? Брать азимуты при таких условиях – равносильно нырянию на большую глубину» [4, с. 73].

Съемкой И. Г. Дорофеев заполнил свыше 14 съемочных планшетов облегченной мензулы. Была произведена съемка по северному берегу оз. Кара-куль. Съемкой по р. Караджилга и ее притокам был добыт совершенно новый картографический материал, изменивший прежние карты этого района. Открыто много новых больших ущелий, ледников, определено много новых высот: «Работать с мензурой одно удовольствие: каждый твой штрих на плане – основа для будущей карты, каждая высота, долина, ущелье – это географическое открытие. При помощи мензулы, ущелье – это географическое открытие» [4, с. 29].

Произведена съемка по долине Кара-чима, где открыт один новый ледник, съемка по верховью р. Ак-джилга, где открыто три новых ледника. Произведена нивелировка от р. Кокуй-бель до р. Джир-уй на протяжении 16 км, впервые произведено обследование и съемка верховьев р. Танымас с их ледниками и установлена возможность прохода от Танымаса по леднику Федченко в долину р. Мук-су. Топографом И. Г. Дорофеевым первым установлено, что ледник Федченко проходит мимо верховья Танымаса, и установлена его примерная длина свыше 70 км. Вести съемку на леднике было особенно не просто: «Мензула потеряла ориентировку, все точки, нанесенные на план, как бы сдвинулись со своих мест. Только установил правильно мензулу и начал работу, как снова

толчок, снова сбита ориентировка. Ледник крякнул, раздался скрип» [4, с. 23].

Впервые пройдены пер. Кашал-аяк, Танымас и новые, ведущие из Абдукагора на ледники Федченко и Академии. На перевале Танымас И. Г. Дорофеев решил пройти по одному ущелью с мензуральной съемкой. Вместе с ним отправилось несколько рабочих таджиков: «После полудня поднялся ветер, стало холодно... Трое рабочих уходят обратно, значит нужно отослать мензулу, часть теплых вещей и идти налегке... Очень не хотелось расставаться с мензулой... Однако на следующее утро вынуждены были расстаться с таджиками и с мензулой» [8, с. 60].

Экспедицией произведена впервые полунструментальная съемка верховьев р. Ванч, Язгулем, Абдукагор. «Несколько часов мы осторожно поднимались до края хребта по снежному насту. А когда подошли к самому краю, то невольно попятиться назад. Перед нами была пропасть не менее 1500 м глубиной! Скала почти отвесно обрывалась от гребня хребта, и мы неожиданно очутились на снеговом карнизе, который повис тонким слоем над пропастью. Нашли оголенную от снега скалу и уселись на ней для производства разного вида съемок: тут и фото, тут и буссольная, и глазомерная. Оказалось, что мы стоим на хребте между Абдукагором и Язгулемом» [9, с. 58].

Также И. Г. Дорофеевым были изучены фототеодолиты системы Р. Финстервальдера и методы работы с ними в высокогорных областях. Маршруты И. Г. Дорофеева существенно дополнили съемку Р. Финстервальдера и Г. Бирсака. Особая ценность работы И. Г. Дорофеева заключалась в том, что им были пройдены мертвые пространства, которые не покрывались съемкой фотограмметристов. Также важно то, что результаты его съемки не нуждались в лабораторной обработке, были готовы непосредственно после ее выполнения на месте и могли быть использованы для нужд других сотрудников экспедиции. Частично при этом И. Г. Дорофеевым перекрывалась съемка германских геодезистов, что представляло значительный интерес для сравнения обоих методов работ. Материалы И. Г. Дорофеева и других участников Экспе-

диции (Н. П. Горбунова, Я. И. Беляева) легли в основу карты ледников системы Федченко в масштабе 1 : 200 000, печатаемой в Трудах Памирской экспедиции. Кроме того, на основе съемки И. Г. Дорофеева, Н. П. Горбунова, Я. И. Беляева, К. В. Исакова подготовлена к печати карта Западного Памира в масштабе 1 : 200 000 [6, с. 44–45].

Важное значение для экспедиции имела работа геодезиста К. В. Исакова. Он должен был прокладывать геодезические ряды в районах работы немецких геодезистов. Исаков создал свою триангуляционную сеть по Алайской долине и склонам Алайского хребта для обеспечения фотограмметрической съемки Заалайского хребта. Изначально руководители экспедиции предполагали, что для обеспечения фототеодолитной съемки будет достаточно сгустить тригонометрическую сеть Военно-топографического управления, заложенную геодезистом М. И. Чейкиным. Еще в 1910 г. на высотах около 5 000 м были им воздвигнуты деревянные пирамиды, заложены долговременные центры [10, с. 60]. Однако при ближайшем знакомстве с рядом Чейкина оказалось, что почти все центры триангуляции разрушены. Совершенно, по-видимому, случайно уцелели только два: Арчат-даван и Машале-гудур. Поиски других центров оказались бесплодными. Таким образом, вопрос об использовании триангуляции Чейкина в долине Алая для нужд фототеодолитной съемки отпал. Основываясь на двух уцелевших центрах, К. В. Исаков проложил новый ряд, общим протяжением с востока на запад в 60 км. Тригонометрическими знаками служили каменные туры до 2 м высоты. Под турами им были заложены ординарные центры в виде камней с крестообразной на них насечкой. Для измерения углов К. В. Исаков пользовался германским теодолитом Вильда № 1959, еще не бывшим в работе. Всего определено 12 пунктов триангуляции 2-го класса, с них засечено 22 вершины Заалайского хребта и определены их высоты.

При выполнении работы К. В. Исаков имел возможность изучить теодолит Вильда. Сопоставляя результаты измерений горизонтальных углов с выводами других наблюдателей, применявших при работах десятисекундный

теодолит, он пришел в выводу, что универсальный инструмент Вильда с диаметром горизонтального лимба в 95 мм в общем соответствовал по точности десятисекундному теодолиту со значительно большим диаметром горизонтального лимба (до 190 мм). Инструмент Вильда по своему малому весу, быстроте отсчетов и легкости обслуживания оказался весьма удобен для триангуляции в горных районах, где сравнительно малое увеличение его трубы (20 раз) компенсировалось прозрачностью атмосферы. Также К. В. Исаков пришел к выводу, что применение этого теодолита на триангуляции 2-го класса на равнине не может заменить десятисекундный универсал Гильдебранда, которым, преимущественно, в то время велись триангуляции 2-го класса в СССР.

Работа геодезистов была бы невозможна без установления астрономических пунктов. Астроном Я. И. Беляев начал их отмечать около озера Кара-куль. Всего Я. И. Беляевым было определено 9 астрономических пунктов [6, с. 45]. На месте каждого оставлял специальную отметку – консервную банку с запиской, к которой сообщал, что здесь им определен астропункт.

Участие в Памирской экспедиции 1928 г. позднее в сильной мере сказалось на судьбах ее участников. Для некоторых она стала важной ступенью в научной карьере. Так, участие в экспедиции круто изменило судьбу математика О. Ю. Шмидта. С 1929 г. О. Ю. Шмидт начал участвовать, а затем и руководить экспедициями в Арктику. За организацию в 1937 г. экспедиции на Северный полюс с целью создания там первой дрейфующей станции был удостоен одним из первых в стране звания Героя Советского Союза [11, с. 11]. Благополучно сложилась и судьба топографа И. Г. Дорофеева. Он продолжил свои исследования на Памире. В 1932 г. в составе новой экспедиции ему удалось нанести на карту высшую точку СССР. В жизни других ученых участие в Памирской экспедиции обернулось тяжелыми обвинениями в годы довоенных репрессий. Как Н. П. Горбунов, так и Н. В. Крыленко были репрессированы в рамках сфальсифицированного «Дела альпинистов» против ведущих советских альпини-

стов, а также энтузиастов и популяризаторов туристического альпинизма [12, 13].

Заключение

Таким образом, общие результаты советских и немецких геодезистов позволили впервые исследовать и нанести на карту большой район Западного Памира. Однако И. Г. Дорофеев упрекал немецких альпинистов-геодезистов в том, что они увлекались восхождениями в ущерб выполнению научных задач. В ходе экспедиции советские геодезисты от своих немецких коллег смогли перенять опыт фотограмметрического метода съемки для высокогорных районов. Это имело важное значение для отечественной геодезии. Более того, вскоре после экспедиции в октябре 1928 г. помощник начальника 1-го отдела ВТУ ГУ РККА О. Ю. Саусверд и начальник 2-го военно-аэрофототопографического отряда ВАФТО Н. А. Блохин были командированы в Германию на завод Цейса в Йене, где первым делом посетили фотограмметрический отдел. На заводе им было показано, в каком виде поступают сорта стекол, как готовятся, шлифуются и полируются линзы [14]. В ходе Памирской экспедиции геодезистами и топографами были исправлены некоторые ошибочные представления о расположении хребтов и ледников. Впервые определен, пройден и нанесен на карту ледник Федченко, а также система его боковых ледников. Найден переход от р. Танымас в долину р. Муксу, пройдены неизвестные или забытые перевалы Танымас, Кашалаяк, Язгулем. Открыто много вершин, ущелий, получены новые данные о процессах оледенения и поведения ледников [15].

Для отечественной высшей школы участие руководителя одного из ведущих инженерно-технических вузов позволило приобрести опыт организации изысканий природных ресурсов в условиях высокогорья. Памирские экспедиции в большой степени способствовали популяризации альпинизма в среде инженерной и научной общественности, и в высшей школе в целом. Вслед за первой состоялись еще десять Памирских экспедиций. Они обогатили ценными сведениями физическую географию СССР, внесли большой вклад в науки о Земле, в исследование ее происхождения, покрова, недр.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров Д. А., Дмитриев А. Н., Копелевич Ю. Х., Ланге Б. Советско-германские научные связи времени Веймарской республики. СПб. : Наука, 2001. 367 с.
2. Россельс Е. М. Банда батьки Горбунова : первая Памирская экспедиция 1928 г. М. : Издательство Игоря Балабанова, 2013. 160 с.
3. Отчет советско-немецкой Алайско-Памирской экспедиции 1928 года (Первая Памирская экспедиция). [Электронный ресурс] URL: <http://nmr.nioch.nsc.ru/history/ap1928.pdf>.
4. Дорофеев И. Г. На заоблачных высотах. М.: Мысль, 1976. 240 с.
5. Крыленко Н. В., Щербаков Д. И., Марков К. К. Пять лет по Памиру. (Итоги Памирских экспедиций 1928, 1929, 1931, 1932, 1933 гг.). Ленинград : 1935. 327 с.
6. Памирская экспедиция 1928 г. Труды экспедиции. Выпуск 1. Общий отчет. Ленинград : Изд-во Академии наук СССР, 1929. 132 с.
7. Дорофеев И. Г. С советско-германской экспедицией на Памир // Геодезист. 1929. № 1. С. 51–56.
8. Дорофеев И. Г. С советско-германской экспедицией на Памир // Геодезист. 1929. № 2. С. 58–65.
9. Дорофеев И. Г. С советско-германской экспедицией на Памир // Геодезист. 1929. № 8. С. 57–64.
10. Богомолова Е. С., Брынъ М. Я., Веселкин П. А., Пандул И. С. История геодезии и земельные отношения. СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2013. 124 с.
11. Аксенов А. Н. Отто Юльевич Шмидт: уроженец Могилева, «злой гений кооперации» и великий ученый. Потребительская кооперация. 2020. № 2 (69). С. 9–12.
12. Ясман З. Д. Не могу добиться справедливости» Письмо жены Н. П. Горбунова, М. А. Смольяниновой И. В. Сталину. 1939 г. Отечественные архивы. 2005. № 5. С. 108–113.
13. Звягинцев А. Г., Орлов Ю. Г. Распятые революцией: Российские и советские прокуроры, XX век, 1922–1936. М. : РОССПЭН, 1998. 511 с.
14. Дорофеев И. Г. С советско-германской экспедицией на Памир // Геодезист. – 1929. № 4. С. 56–65.
15. Ficker H. Die Alai (Pamir) Expedition 1928 (Vorläufige Berichte der deutschen Teilnehmer). Einleitung. Deutsche Forschung. Aus der Arbeit der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft. Berlin. 1929. P. 7.

REFERENCES

1. Alexandrov D. A., Dmitriev A. N., Kopelevich Yu. Kh., Lange B. (2001). *Sovetsko-germanskie naučnye svâzi vremeni Vejmarskoj respubliki [Soviet-German scientific connections during the Weimar Republic]* / ; [Ans. ed. Kolchinsky E.I.]. St. Petersburg 367 p.
2. Rossels E. M. (2013). *Banda bat'ki Gorbunova : pervaya Pamirskaya ekspeditsiya 1928 g. [Batko Gorbunov's Gang: the First Pamir Expedition of 1928]* Moscow 160 p.
3. Report of the Soviet-German Alai-Pamir expedition of 1928 (First Pamir expedition). Retrieved from: <http://nmr.nioch.nsc.ru/history/ap1928.pdf>
4. Dorofeev I. G. (1976). *Na zaoblachnykh vysotakh. [At the heights beyond the clouds]* Moscow 240 p.
5. Krylenko N. V., Shcherbakov D. I., Markov K. K. (1935). *Pyat' let po Pamiru. (Itogi Pamirskikh ekspeditsiy 1928, 1929, 1931, 1932, 1933 gg.) [Five years in the Pamirs. (Results of the Pamir expeditions of 1928, 1929, 1931, 1932, 1933)]*. Leningrad 327 p.
6. *Pamirskaya ekspeditsiya 1928 g. Trudy ekspeditsii. Vypusk 1. Obshchiy otchet (1929). [Pamir expedition of 1928. Expedition works. Issue 1. General report.]*. Leningrad 132 p.

7. Dorofeev I. G. (1929). With the Soviet-German expedition to the Pamirs. *Geodezist [Geodezist]*. No. 1. Pp. 51–56.
8. Dorofeev I. G. (1929). With the Soviet-German expedition to the Pamirs. *Geodezist [Geodezist]*. No. 2. Pp. 58–65.
9. Dorofeev I. G. (1929). With the Soviet-German expedition to the Pamirs. *Geodezist [Geodezist]*. No. 8. Pp. 57–64.
10. Bogomolova E. S., Bryn M.Ya., Veselkin P.A., Pandul I.S. (2013). *Istoriya geodezii i zemel'nykh otnosheniy [History of geodesy and land relations]*. St. Petersburg 124 p.
11. Aksenov A. N. (2020). Otto Yulievich Schmidt: a native of Mogilev, the “evil genius of cooperation” and a great scientist. *Potrebitel'skaya kooperatsiya [Consumer cooperation]*. No. 2 (69). Pp. 9–12.
12. Yasman Z. D. (2005). “I Cannot Achieve Justice” Letter from the wife of N.P. Gorbunov, M.A. Smolyaninova, I.V. Stalin. 1939. *Otechestvennyye arkhivy [Domestic archives]*. No. 5. – Pp. 108–113.
13. Zvyagintsev A. G.; Orlov Yu. G. (1998). *Raspyatyie revolyutsiyey: Rossiyskiye i sovetskiye prokurory, KHKH vek, 1922–1936 [Crucified by the Revolution: Russian and Soviet Prosecutors, 20th Century, 1922–1936]*. Moscow 511 p.
14. Dorofeev I. G. (1929). With the Soviet-German expedition to the Pamirs. *Geodezist [Geodezist]*. No. 4. Pp. 56–65.
15. Ficker H. Die Alai (Pamir) Expedition 1928 (Vorläufige Berichte der deutschen Teilnehmer). Einleitung // Deutsche Forschung. Aus der Arbeit der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft. – Berlin. 1929. – P. 7.

Об авторе

Денис Игоревич Муренко – кандидат исторических наук, доцент Новосибирского университета экономики и управления.

Author details

Denis I. Murenko – PhD, Associate Professor.

Получено / Received 10.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.12.2025

Принята к публикации / Accepted 05.01.2026

УДК 378.147:528

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-169-181>

Формирование практико-ориентированной цифровой среды в университете для подготовки инженеров-геодезистов

В. В. Ознамец^{1✉}, М. В. Рязанцева², А. О. Субочева², Е. С. Якушова²

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

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: oznamec@list.ru

Аннотация. Подготовка инженеров-геодезистов в современном университете направлена на развитие профессиональных компетенций через интеграцию теоретических знаний и практических навыков с использованием цифровых технологий, лабораторных комплексов и проектных методов обучения, включая стажировки и полевые геодезические практики. Это формирует практико-ориентированную образовательную среду, обеспечивающую подготовку специалистов, способных эффективно решать современные технические задачи в условиях динамично развивающейся цифровой среды. Цель данного исследования заключалась в определении направлений формирования практико-ориентированной цифровой среды в техническом университете для подготовки инженеров-геодезистов. Для достижения поставленной цели были использованы методы анкетирования, контент-анализа и сравнительного анализа опыта подготовки геодезистов в России и за рубежом. В период с марта по октябрь 2025 г. авторами были проведены социологические опросы 677 студентов и 47 преподавателей трех российских вузов, осуществляющих подготовку инженеров-геодезистов по специальности «Прикладная геодезия»: Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Государственного университета по землеустройству (ГУЗ), Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). На основе результатов опросов было выявлено, что в процессе обучения студенты изучают все современные информационные технологии, используемые в работе инженерами-геодезистами. Контент-анализ мнений опрошенных студентов всех трех вузов показал, что, несмотря на высокий уровень удовлетворенности процессом обучения, студенты считают целесообразным увеличить количество практических занятий, особенно связанных с глобальными навигационными системами, беспилотными аппаратами и технологиями искусственного интеллекта. В заключительной части статьи предложены рекомендации по совершенствованию образовательного процесса будущих инженеров-геодезистов и повышению уровня цифровизации геодезического образования в России.

Ключевые слова: образовательный процесс, подготовка инженеров-геодезистов, технический университет, цифровая среда, информационные технологии

Для цитирования:

Ознамец В. В., Рязанцева М. В., Субочева А. О., Якушова Е. С. Формирование практико-ориентированной цифровой среды в университете для подготовки инженеров-геодезистов. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 169–181. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-169-181>

Developing a practice-oriented digital environment at the university for training surveying engineers

V. V. Oznamets¹, M. V. Ryazantseva^{2✉}, A. O. Subocheva², E. S. Yakushova²

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

²Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, Russian Federation

e-mail: mvryazantseva@fa.ru

Abstract. Currently training surveying engineers at a university focuses on developing professional competencies through the integration of theoretical knowledge and practical skills, leveraging digital technologies, laboratory facilities, and project-based learning methods, including internships and field geodetic practices. This approach fosters a practice-oriented educational environment that prepares specialists capable of efficiently addressing contemporary technical challenges within a rapidly evolving digital environment. The objective of the study is to identify areas for forming a practice-oriented digital environment at a technical university for training surveying engineers. To achieve this goal, methods of questionnaire surveys, content analysis, and comparative analysis of surveying engineer training experiences in Russia and abroad were employed. In 2025, the authors conducted sociological surveys of 677 students and 47 faculty members from 3 Russian universities offering the "Applied Geodesy" program: Moscow State University of Geodesy and Cartography, State University for Land Management, and Siberian State University of Geosystems and Technologies. The survey results revealed that students master all contemporary information technologies used by practicing surveying engineers. Content analysis of students' responses across all universities indicated that, despite high satisfaction with the learning process, respondents deem it advisable to increase the volume of practical training, particularly in GNSS, UAVs, and AI technology. The article concludes with recommendations for enhancing the training of future surveying engineers and advancing the digitalization of surveying education in Russia.

Keywords: educational process, engineer training, technical university, surveying engineer, digital environment, information technology

For citation:

Oznamets V. V., Ryazantseva M. V., Subocheva A. O., Yakushova E. S. (2026). Developing a practice-oriented digital environment at the university for training surveying engineers. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 169–181. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-169-181>

Введение

Подготовка инженеров в современном университете ориентирована на решение сложных технических задач посредством использования современных цифровых технологий и лабораторных комплексов, включающих проведение практических занятий в полевых условиях. Это позволяет обеспечить глубокое освоение будущими специалистами профессиональных компетенций [1, 2] и формирует практико-ориентированную среду, которая включает как традиционный образовательный процесс подготовки специалистов

с высшим образованием (лекционные и семинарские занятия, лабораторные работы, полевые геодезические практики и т. д.), так и проектное обучение, использующее проблемно-ориентированный метод обучения студентов в команде, а также стажировки на предприятиях и в компаниях. Важным компонентом современной образовательной среды является участие студентов в профессионально-ориентированных мероприятиях: круглых столах с привлечением специалистов геодезических организаций, соревнованиях геодезических бригад студентов, тематических школах, международных проектах и др.

Геодезия является высокотехнологичной отраслью, в которой используется современная геодезическая техника, приборы, программные продукты, обрабатываются большие базы данных. В этой связи применение современных образовательных технологий с использованием искусственного интеллекта (ИИ) может значительно повысить эффективность подготовки будущих инженеров-геодезистов. В рамках расширенной стратегии развития ИИ в РФ планируется увеличить число выпускников вузов, в том числе и геодезистов, освоивших программы в области ИИ (О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» и в Национальную стратегию, утвержденную этим Указом: Указ Президента Российской Федерации от 15.02.2024 № 214. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный).

Для подготовки грамотных инженеров-геодезистов технический университет должен создать современную образовательную среду. Перечислим её ключевые элементы:

1. Актуальные образовательные программы. Они должны соответствовать действующим профессиональным стандартам в геодезии [3].

2. Высокий уровень квалификации преподавателей. Их профессиональные компетенции имеют фундаментальное значение для качества обучения [4].

3. Постоянное совершенствование учебного процесса за счёт внедрения современных технологий, которые уже доказали свою эффективность в мировой практике. Например:

1) виртуальная и дополненная реальность (VR/AR). Эти инструменты уже широко используются в ведущих зарубежных университетах для подготовки инженеров. С их помощью можно проводить виртуальные полевые практики, симуляции работ и наглядно визуализировать сложные данные [5, 6, 7].

2) игровые методы и симуляции. Геймификация и симуляторы повышают мотивацию и самостоятельность студентов. Игровой формат особенно эффективен для оценки на практических занятиях. В игре студенты ак-

тивнее усваивают знания, так как задействуют все каналы восприятия [6, 8].

3) онлайн-обучение. Использование массовых открытых онлайн-курсов (МООС) и других форм e-learning позволяет гибко осваивать современные методы. Например, студенты могут изучать программирование, геоинформационные системы (ГИС) и методы обработки данных [9, 10, 11].

В условиях дистанционного обучения особую сложность представляет организация качественной отработки практических навыков, поскольку для формирования устойчивых навыков работы с приборами необходима многократная отработка действий, что эффективно реализуется с помощью специализированных электронных тренажеров [12].

Также важным моментом для формирования практико-ориентированной среды в университете является создание условий для решения задач анализа геоинформационных данных посредством специализированных программных продуктов, которые повышают эффективность и точность обработки пространственных данных в современных условиях цифровизации геодезических работ [13, 14]:

1) использование технологий интеллектуального анализа материалов лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Ключевой задачей является разработка методологии для автоматического распознавания и 3D-идентификации различных объектов для создания цифровых инженерно-топографических планов, в целях кадастра недвижимости, землеустройства и градостроительства;

2) внедрение ИИ и машинного обучения, использование которых эффективно для анализа геоданных, автоматизации интерпретации и повышения точности измерений [5, 15, (О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» и в Национальную стратегию, утвержденную этим Указом: Указ Президента Российской Федерации от 15.02.2024 № 214. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный)], автоматической адаптации режимов работы сложного геодезического оборудования (роботизиро-

ванные тахеометры, лазерные сканеры, ГНСС-приемники) к условиям окружающей среды и для решения трудоемких задач обработки измерений [16].

Цель данного исследования заключалась в определении направлений формирования практико-ориентированной цифровой среды в техническом университете для подготовки инженеров-геодезистов.

Методы и материалы

В исследовании применялись традиционные подходы и научные методы: анкетирование и контент-анализ, сравнительный анализ опыта подготовки геодезистов в российских и зарубежных вузах.

Для определения направлений формирования практико-ориентированной цифровой среды в техническом университете в целях подготовки инженеров-геодезистов в период с марта по октябрь 2025 г. были проведены социологические опросы студентов и преподавателей трех вузов, осуществляющих подготовку инженеров-геодезистов по специальности «Прикладная геодезия»: Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Государственного университета по землеустройству (ГУЗ), Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). Всего в опросе приняли участие 677 студентов и 47 преподавателей. Общий профиль респондентов-студентов представлен в табл. 1.

Таблица 1. Общий профиль респондентов-студентов

ВУЗ	Количество респондентов		Пол		Курс, чел.				
	чел.	в %	мужской	женский	1	2	3	4	5
МИИГАиК	260	38,4	71,2	28,8	67	49	65	46	33
ГУЗ	162	23,9	77,8	22,2	49	38	32	22	21
СГУГиТ	255	37,7	71,8	28,2	94	34	56	41	30
Всего	677	100	73,0	27,0	210	121	153	109	84

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

Среди респондентов во всех вузах преобладали студенты 1-го курса, менее активно в опросе участвовали студенты 5-го курса. Профессия инженера-геодезиста является преимущественно мужской, в связи с чем 73 % респондентов – это юноши, 27 % – девушки.

Перед проведением опроса были сформулированы следующие гипотезы:

1. Уровень подготовки студентов по специальности «Прикладная геодезия» – высокий, и будущие инженеры-геодезисты приобретают достаточный объем теоретических знаний и практических навыков, необходимых для дальнейшей работы.

Для проверки данной гипотезы анализировались: уровень удовлетворенности студентов процессом обучения, условиями обучения, оценка компетентности преподавателей, самооценка теоретической и технологической подготовки.

2. В образовательном процессе недостаточно эффективно используются современные цифровые технологии.

Для проверки данной гипотезы были проанализированы ответы респондентов относительно

изучаемых в процессе обучения технологий и методов. При создании социологической анкеты авторы ориентировались на используемые в России и за рубежом современные образовательные технологии, а также на мнения отраслевых экспертов относительно технологий, необходимых для современного геодезиста.

Для сбора информации авторами статьи был разработан соответствующий инструментарий, включающий две анкеты:

1. Анкета для опроса студентов. Цель опроса заключалась в общей оценке уровня удовлетворенности студентов качеством получаемого образования и уровня своей практической подготовки, его конкурентоспособности на рынке труда.

2. Анкета для опроса преподавателей. Цель опроса заключалась в сборе информации об используемых технологиях обучения, необходимости изменения технологий обучения в цифровую эпоху.

Сбор данных осуществлялся через онлайн-опросы в Google Формы с последующей обработкой в программе SPSS Statistics. Для проверки статистической значимости различий в

ответах респондентов с разных курсов был применен непараметрический критерий Краскела – Уоллиса, а также критерий Манна – Уитни.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования показали наличие существенных различий в восприятии ка-

чества образования студентами разных университетов. Практически по всем параметрам опроса (уровень удовлетворенности студентов качеством получаемого образования и др.) студенты СГУГиТ поставили более высокие оценки (табл. 2).

Таблица 2. Средние оценки ответов студентов на вопросы анкеты

Вопрос	МИИГАиК		ГУЗ		СГУГиТ		Среднее	
	среднее	ст. откл.	среднее	ст. откл.	среднее	ст. откл.	среднее	ст. откл.
1. Удовлетворенность студентов процессом обучения	4,00	0,885	4,16	0,939	4,47	0,752	4,21	0,875
2. Восприятие респондентами компетентности преподавателей	4,02	0,911	4,17	0,934	4,56	0,677	4,26	0,869
3. Восприятие респондентами востребованности образования	3,84	0,574	3,60	0,994	3,65	0,926	3,71	0,833
4. Восприятие респондентами соответствия навыков требованиям работодателей	2,19	1,370	2,14	1,578	2,45	1,497	2,27	1,474
5. Уровень развитости цифровой инфраструктуры (ГУЗ, СГУГиТ) и комфортности среды обучения (МИИГАиК)	3,96	0,919	3,48	1,301	4,25	0,905	3,95	1,161
6. Восприятие уровня своей технологической подготовки	3,54	0,884	3,64	1,140	3,81	1,114	3,67	1,044
7. Восприятие уровня своей теоретической подготовки	3,63	0,914	3,85	1,053	3,97	1,027	3,81	1,001

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

По уровню удовлетворенности процессом обучения студенты СГУГиТ более удовлетворены процессом обучения в университете (средние баллы по вузам: СГУГиТ (4,47), ГУЗ (4,16), МИИГАиК (4,00)). Кроме того, более низкое значение стандартного отклонения (0,752) указывает на довольно высокую согласованность ответов респондентов.

Компетентность преподавателей оценивается высоко студентами всех университетов. Можно сказать, что это сильная сторона всех участвующих в исследовании вузов. Но более высоко уровень компетентности преподавателей оценивают учащиеся СГУГиТ (средние баллы по вузам: СГУГиТ (4,56), ГУЗ (4,17),

МИИГАиК (4,02)). Более низкое значение стандартного отклонения в СГУГиТ (0,672) говорит о единодушии студентов в оценке профессионализма своих наставников.

Результаты опроса показали, что респонденты-студенты на достаточно высоком уровне оценивают условия обучения и развитость цифровой инфраструктуры. Лидером по этим показателям является СГУГиТ, аутсайдером – ГУЗ. Однако средняя оценка близка к «хорошо», а не «отлично», что указывает на высокий потенциал развития цифровой среды во всех исследуемых вузах.

По самооценке уровня своей технологической и теоретической подготовки все вузы находятся в близком диапазоне: 3,7–3,97

(«скорее уверены, но не полностью»). Немного более уверенно по уровню технологической и теоретической подготовки чувствуют себя студенты СГУГиТ.

Подготовка инженеров-геодезистов во всех трёх вузах предполагает активное использование современных информационных технологий. В связи с этим нами были проанализированы ответы студентов относительно изучения в учебном процессе следующих технологий: геоинформационных технологий (ГИС); глобальных навигационных спутнико-

вых систем (ГНСС); трехмерного информационного моделирования (ТИМ); беспилотных летательных аппаратов (БЛА); использования искусственного интеллекта для работы с большими данными (ИИ для работы с БД).

Поскольку данные технологии изучаются на разных курсах, было решено более детально проанализировать ответы студентов 5-х курсов всех вузов. В процессе анализа использовалась дихотомическая шкала ответов: 1 – технологию изучали, 0 – не изучали. Результаты обобщены в табл. 3.

Таблица 3. Средние оценки ответов респондентов по университетам относительно изучения современных информационных технологий

Технология	МИИГАиК		ГУЗ		СГУГиТ		Среднее	
	среднее	ст. откл.	среднее	ст. откл.	среднее	ст. откл.	среднее	ст. откл.
ГИС	0,61	0,496	0,86	0,359	0,90	0,305	0,77	0,421
ТИМ	0,3	0,467	0,14	0,359	0,43	0,504	0,25	0,436
ГНСС	1,0	0,000	0,9	0,301	0,97	0,183	0,9	0,187
БЛА	0,15	0,364	0,14	0,359	0,43	0,504	0,25	0,436
ИИ для работы с БД	0,09	0,292	0,38	0,498	0,03	0,183	0,14	0,352

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

Как следует из данных табл. 3, основной технологией, с которой лучше всего знакомы студенты всех трёх вузов, является ГНСС. 100 % студентов МИИГАиК 5-го курса ответили, что изучали использование ГНСС, в СГУГиТ – 97 % и в ГУЗ – 90 %. Также достаточно хорошо респонденты-студенты знакомы с принципами работы ГИС.

Интересный результат был получен относительно работы с технологий ИИ. Наивысший результат показали студенты 4-го курса (среднее = 0,36), в то время, как у студентов 5-го курса среднее значение составило 0,14. Поэтому, учитывая различия в образовательных программах разных вузов, для построения рейтинговой оценки по данной технологии был взят средний показатель по всем курсам. Анализ различий изучения технологий ИИ в разных вузах показал, что лидером по данному направлению является СГУГиТ: 79 % студентов 2-го курса, 46 % студентов 3-го курса, 68 % студентов 4-го курса ответили положительно на вопрос «изучали ли вы технологии ИИ для работы с большими данными» (среднее значение по всем курсам –

0,40). На втором месте – МИИГАиК (среднее значение – 0,16), на третьем месте – ГУЗ (среднее значение – 0,12).

Выполненная нами рейтинговая оценка уровня соответствия образовательной программы современным тенденциям показывает, что, по мнению студентов, наиболее высокий уровень интеграции современных информационных технологий в обучение наблюдается в СГУГиТ (табл. 4).

Таблица 4. Рейтинговая оценка вузов по уровню соответствия образовательной программы современным тенденциям

Использование технологий	МИИ-ГАиК	ГУЗ	СГУГиТ
ГИС	3	1	2
ТИМ	2	3	1
ГНСС	1	3	2
БЛА	2	3	1
ИИ для работы с БД	2	3	1
Общее количество баллов	10	13	7
Место в рейтинге	2	3	1

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

В опросе профессорско-преподавательского состава приняло участие 47 человек: 63,8 % опрошенных представляли СГУГиТ, 19,0 % – МИИГАиК, 17,1 % – ГУЗ. Как сле-

дует из самооценки преподавателей, на более высоком уровне цифровизации находится образовательный процесс в СГУГиТ (табл. 5).

Таблица 5. Результаты самооценки респондентами уровня цифровизации своего вуза

ВУЗ	Уровень цифровизации образовательного процесса (max 5)		Качество цифровой инфраструктуры университета (max 5)		Доступность лицензионного программного обеспечения (max 5)	
	Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.
МИИГАиК	3,11	0,60	3,00	1,12	2,67	1,12
СГУГиТ	3,97	1,02	3,93	0,88	3,21	1,15
ГУЗ	3,00	3,00	3,13	1,13	3,25	0,71
Среднее значение	3,63	1,195	3,61	1,04	3,11	1,08

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

В целом респонденты-преподаватели оценили общий уровень цифровизации геодезического образования как средний (3,63 балла из 5), качество цифровой инфраструктуры – 3,61 балла из 5, доступность лицензионного программного обеспечения – 3,11 из 5. Причем, как более низкий уровень цифровизации

и качества цифровой инфраструктуры оценивают преподаватели, имеющие опыт работы в университете от 5 до 10 лет, а доступ к лицензионному программному обеспечению – с опытом работы более 10 лет. Результаты анализа обобщены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты оценки значимости различий в оценках респондентов, являющихся представителями разных вузов, относительно уровня цифровизации вуза, развитости цифровой инфраструктуры и доступности преподавателей к лицензионному программному обеспечению

Зависимая переменная	Хи-квадрат	p-value	Вывод о значимости различий в оценках респондентов
1. Оценка респондентами уровня цифровизации своего вуза	9,338	0,0093	значимы
2. Оценка респондентами уровня доступности к лицензионному программному обеспечению	3,637	0,162	не значимы
3. Оценка респондентами качества цифровой инфраструктуры своего вуза	7,151	0,0283	значимы

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

На основе критерия Краскела – Уоллиса не выявлено статистически значимых различий в оценке уровня цифровизации вуза, доступности к лицензионному программному обеспечению, качества цифровой инфраструктуры между оценками респондентов, обладающих разным опытом работы, обладающих разными научными степенями и занимающих разную должность.

Однако более детальный анализ, основанный на ответах респондентов об используемых в процессе обучения студентов информационных технологий, показал, что чаще они используются респондентами-преподавателями, работающими в ГУЗ (табл. 7).

Таблица 7. Средний уровень использования респондентами информационных технологий в учебном процессе

Технология	МИИГАиК		СГУГиТ		ГУЗ		Среднее по всем вузам	Стандартное отклонение по всем вузам
	Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.	Среднее	Ст. откл.		
ГИС	0,44	0,527	0,69	0,471	0,75	0,463	0,65	0,482
ГНСС	0,44	0,527	0,34	0,484	0,88	0,354	0,46	0,504
ТИМ	0,56	0,527	0,28	0,455	0,50	0,535	0,37	0,488
БЛА	0,33	0,500	0,34	0,351	0,63	0,463	0,39	0,493
Использование технологий наземного и воздушного лазерного сканирования	0,44	0,527	0,14	0,484	0,75	0,518	0,30	0,465
ИИ для работы с БД	0,11	0,333	0,34	0,484	0,13	0,354	0,26	0,444

Источник: составлено авторами на основе проведенного опроса.

При этом существуют технологии, где наблюдается сильный разрыв между вузами. Например, это касается уровня использования в учебном процессе технологий наземного и воздушного лазерного сканирования, а также ГНСС. Как следует из ответов респондентов-преподавателей, в ГУЗ технология ГНСС интегрирована в учебный процесс лучше, чем в других. Различия слишком велики, чтобы их можно было объяснить случайностью.

Анализ используемых в процессе обучения образовательных технологий показал, что при подготовке будущих инженеров-геодезистов преимущественно используются традиционные методы обучения: лабораторные работы (89,4 %), учебные практики (74,5 %) и практические занятия (72,3 %). Более 53 % преподавателей используют онлайн-обучение. Интерактивные методы обучения и моделирование практических ситуаций используют 42,6 % преподавателей, которые приняли участие в опросе. Современные цифровые технологии, такие как симуляторы и VR-технологии используются недостаточно широко (21,3 % и 12,8 % соответственно).

С одной стороны, преимущественное использование лабораторных работ и практических занятий в процессе подготовки инженеров-геодезистов очевидно, поскольку будущие инженеры должны уметь пользоваться различными приборами, такими как тахеометры, лазерные сканирующие устройства, ГНСС-оборудование, нивелиры, теодолиты и

др. Формирование навыков работы с различными приборами гораздо эффективнее формировать в ходе практических занятий. Вместе с тем, в зарубежной практике в процессе обучения различным технологиям, используются симуляторы и VR-технологии, которые отчасти решают проблемы недостатка финансирования и необходимого оборудования в вузах.

Несмотря на доминирование традиционных подходов в образовательном процессе, преподаватели достаточно высоко оценивают уровень теоретической и технологической подготовки современных студентов (медианное значение ответов 4,0 из 5). Статистически значимых различий в ответах преподавателей исследуемых вузов не выявлено.

Заключение

Таким образом, по итогам проведенного исследования уверенным лидером является СГУГиТ: ответы студентов демонстрируют высокий уровень положительных оценок по уровню удовлетворенности процессом обучения и компетентности преподавателей, комфортности условий в университете. Зонами роста является низкий процент студентов с опытом работы и недостаточно тесная связь данного учебного заведения с работодателями.

К учебному заведению с потенциалом можно отнести ГУЗ. Сильной стороной вуза является хорошая оценка респондентами уровня компетентности преподавателей. Однако здесь

выявлен самый низкий уровень оценок респондентами уровня цифровизации вуза и восприятия студентами соответствия получаемых навыков требованиям работодателей.

Сильной стороной МИИГАиК является самый высокий процент студентов с опытом работы по получаемой специальности (47 % респондентов). Кроме того, студенты данного вуза дают более высокие оценки при ответе на вопрос о своей востребованности на рынке труда.

Результаты проведенных опросов показали, что студенты всех трех вузов в процессе обучения изучают все современные информационные технологии, используемые в работе инженерами-геодезистами. В то же время контент-анализ выявил, что на фоне общей удовлетворенности обучением студенты выступают за расширение практикума, особенно по работе с глобальными навигационными системами, лазерными сканерами, БЛА и ИИ-технологиями.

В качестве основных проблем, препятствующих цифровизации образования и формированию практико-ориентированной цифровой среды в университете для подготовки инженеров-геодезистов, респондентами-преподавателями были указаны: недостаточное финансирование (67,4 %), низкая скорость цифровизации образования (39,1 %), консер-

ватизм преподавателей и нехватка квалифицированных кадров (26,1 %), недостаток мотивации преподавателей (21,7 %). Только один преподаватель ответил, что процессу цифровизации образовательного процесса ничего не мешает. Ещё один из респондентов в качестве значимого фактора указал на слабое взаимодействие между вузами и предприятиями.

Таким образом, обе выдвинутые гипотезы исследования, заключающиеся в предположениях: 1) уровень подготовки студентов по специальности «Прикладная геодезия» в вузах является высоким, и будущие инженеры-геодезисты приобретают достаточный объем теоретических знаний и практических навыков, необходимых для работы по получаемой специальности; 2) в образовательном процессе недостаточно эффективно используются современные цифровые технологии, подтвердились.

Исходя из результатов проведенных опросов, а также основываясь на изучении отечественного и зарубежного опыта подготовки инженеров, собственном педагогическом опыте, авторами предложены рекомендации по совершенствованию образовательного процесса будущих инженеров-геодезистов и повышению уровня цифровизации геодезического образования в России (табл. 8).

Таблица 8. Основные направления по формированию практико-ориентированной цифровой среды в университете для подготовки инженеров-геодезистов

Рекомендация	Пути реализации рекомендации
Создание и внедрения «Цифрового двойника» (Digital Twin) реального учебного геодезического полигона, который будет обновляться в режиме, близком к реальному времени	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для интеграции данных возможно использование данных с БЛА и мультиспектральных камер, наземных 3D-сканеров. 2. В виртуальной среде можно будет моделировать различные условия, например, моделировать работу на сложных и опасных объектах, в разное время суток, разных погодных условиях. 3. В виртуальной системе можно имитировать неисправность оборудования. 4. Возможно преднамеренно вносить погрешности в данные, которые студенты должны самостоятельно найти и исправить
Для интерактивного изучения оборудования, методик съемки и особенностей сложных объектов; рекомендуется пользование дополненной (AR) и виртуальной реальности (VR)	<ol style="list-style-type: none"> 1. VR-тренажеры: полное погружение в виртуальное пространство для отработки сложных измерений, камеральной обработки данных и взаимодействия с современным ПО (например, CREDO, AutoCAD). 2. AR-инструкции и моделирование: использование AR-очков или планшетов в полевых условиях. 3. «Цифровой помощник»: наложение пошаговых инструкций по настройке тахеометра или лазерного сканирующего устройства на реальное оборудование. 4. Виртуальная разметка: проецирование проектных осей и точек на реальную местность через AR-устройство для отработки навыков разбивочных работ

Окончание табл. 8

Рекомендация	Пути реализации рекомендации
Развитие компетенций в области БЛА (дронов) и лазерного сканирования. Рекомендация: сделать работу с БЛА и 3D-сканерами не отдельным курсом, а неотъемлемой частью учебного плана	1. Сквозные проекты: студенты должны выполнять проект от аэрофотосъемки местности БЛА → обработки данных в ПО (Agisoft Metashape, Pix4D) → создания цифровой модели местности (ЦММ) и ортофотоплана → использования этих данных для проектирования в GIS (ArcGIS, QGIS) или CAD-системах. 2. Анализ облаков точек: учить не просто собирать данные лазерного сканирования, но и анализировать их: вычислять объемы, проводить мониторинг деформаций, создавать исполнительные схемы
Интеграция данных и работа в «облачных» средах. Рекомендация: обучать работе в сквозных цифровых средах, имитирующих современные проектные и строительные процессы	1. Платформы для совместной работы: использовать аналоги ТИМ. Студенты учатся работать с данными в общей облачной среде, доступной проектировщикам, архитекторам и строителям. 2. Работа с Big Data: учить основам анализа больших геопространственных данных, включая спутниковые снимки и данные IoT-датчиков для мониторинга
Геймификация и адаптивное обучение. Рекомендация: повысить мотивацию и эффективность усвоения материала через игровые механики и персонализированные траектории обучения	1. Система рейтингов и баллов: начисление очков за скорость и точность измерений, решение сложных задач на виртуальном полигоне. 2. Соревнования и квесты: проведение чемпионатов по цифровой геодезии, где команды соревнуются в выполнении проекта на время. 3. Адаптивные тренажеры: программное обеспечение, которое анализирует ошибки студента и автоматически подбирает ему дополнительные задания для отработки слабых мест
Развитие «гибких» навыков (Soft Skills) в цифровой среде. Рекомендация: учить не только работать с данными, но и управлять проектами, коммуницировать и принимать решения на основе данных	1. Создание виртуальных проектных команд: моделирование ситуации, когда часть команды (геодезисты, проектировщики) находятся в разных локациях, студенты учатся эффективно взаимодействовать онлайн. 2. Визуализация и презентация данных: учить создавать интерактивные отчеты, дашборды и 3D-визуализации для заказчика, а не просто таблицы с координатами

Источник: составлено авторами.

Кроме этого, безусловно, необходимо системное увеличение целевого финансирования вузов по статье «цифровая трансформация». Как показал опрос преподавательского состава, ключевым барьером на пути создания полноценной практико-ориентированной среды является дефицит современного оборудования. В результате, даже при наличии сильной теоретической программы, студенты лишены возможности отрабатывать навыки на современных образцах техники, которая является отраслевым стандартом, что создает разрыв между академическими знаниями и требованиями рынка труда.

Эту проблему, по нашему мнению, можно было бы эффективно решить посредством создания в университетах базовых кафедр, организованных совместно с проектными и производственными компаниями геодезического профиля. Подобная модель партнерства носит взаимовыгодный характер. Со стороны вуза она позволяет получить доступ к передовой технологи-

ческой инфраструктуре бизнеса, актуальным методикам и экспертизе практикующих инженеров. Для компаний это возможность целенаправленно готовить специалистов «под себя», минимизируя затраты на их дальнейшую адаптацию. В рамках базовых кафедр студенты могли бы не только работать на современном оборудовании, но и участвовать в реальных проектах, выполняя конкретные производственные задачи, что является сутью практико-ориентированного подхода.

Таким образом, сочетание целевого государственного финансирования и развития института базовых кафедр является, на наш взгляд, наиболее действенным механизмом для повышения уровня цифровизации геодезического образования в России и формирования той самой практико-ориентированной цифровой среды, которая отвечает вызовам современной экономики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Klaassen R., Hellendoorn H., Bossen L. (2024). Transforming Engineering Education in Learning Ecosystems for Resilient Engineers. *IEEE Transactions on Education*, 67, 44–55. DOI 10.1109/TE.2023.3303364.

2. Nelson R., Marone V., Garcia S., Yuen T., Bonner E., Browning J. (2021). Transformative Practices in Engineering Education: The Embedded Expert Model. *IEEE Transactions on Education*, 64, 187–194. DOI 10.1109/TE.2020.3026906.
3. Карпик А. П., Середович С. В., Ганагина И. Г. Проблемы разработки основной профессиональной образовательной программы высшего образования по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование (уровень бакалавриата) в соответствии с ФГОС ВО 3++ с учетом профессиональных стандартов. *Вестник СГУГиТ*. 2019. Т. 24. № 2. С. 248–256.
4. Мартынов Г. П., Янкелевич С. С. Оптимизация деятельности профессорско-преподавательского состава при введении профессиональных стандартов в вузах Российской Федерации. *Вестник СГУГиТ*. 2018. Т. 23. № 3. С. 267–278.
5. Gunderson K., Holmes R., & Loisel J. (2020). Recent Digital Technology Trends in Geoscience Teaching and Practice. *GSA Today*, 30, 39-41. DOI 10.1130/gsatg404gw.1.
6. Rozhi I., Udovenko I., & Dorozhko Y. (2024). The use of geodetic data in the development of virtual and pre-reality for training and simulations. *Spatial development*. DOI 10.32347/2786-7269.2024.9.279-290.
7. Morkovin V. A., Penkov V. A., Storodubtseva T. N. Geodetic aspect in information modeling of structures // Materials of the National Scientific and Practical Conference «Circular economy for the purpose of sustainable development of industries and territories». FSBE Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2024. P. 254–260. DOI 10.58168/CIRCULAR2024_254-260.
8. Dudnik A., & Tupoleva G. Game as a scientific and methodological basis of modern geodetic education. *E3S Web of Conferences*. 2021. DOI 10.1051/e3sconf/202128105006.
9. Ervin S. M. (2016). Technology in geodesign. *Landscape and Urban Planning*, 156, 12–16. DOI 10.1016/J.LANDURBPLAN.2016.09.010.
10. Солнышкова О. В. Электронные образовательные ресурсы при проведении деловой игры в рамках геодезической практики : сборник материалов международной научно-методической конференции «Актуальные вопросы образования. Модель проблемно-ориентированного проектного обучения в современном университете». Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Т. 1. С. 170–172.
11. Дудышева Е. В., Солнышкова О. В. Гибридные среды обучения студентов инженерных специальностей основам работы с геодезическим оборудованием. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования*. 2020. Т. 17. № 2. С. 94–106.
12. Солнышкова О. В., Григорьев Д. О. Разработка электронных тренажеров по геодезическим приборам для расширения возможностей дистанционного обучения. *Актуальные вопросы образования. Паритет традиционного и цифрового образования в вузе: приоритеты, акценты, лучшие практики : сборник материалов международной научно-методической конференции*. Новосибирск : СГУГиТ, 2022. Т. 2. С. 87–90.
13. Максименко Л. А., Таныгина Е. А., Калюжин В. А. Применение программных продуктов Autodesk при подготовке обучающихся по направлению «Землеустройство и кадастры». *Вестник СГУГиТ*. 2018. Т. 23. № 1. С. 240–249.
14. Бугакова Т. Ю., Шарпапов А. А. Применение интеллектуальных систем для решения задач в области геопространственных технологий и дистанционного зондирования : сборник материалов национальной научно-практической конференции «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения». Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Т. 1. С. 163–168.
15. Pang B., Zheng Z., Wang G., & Wang P. Learning the Geodesic Embedding with Graph Neural Networks. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2023, 42, 1–12. DOI 10.1145/3618317.
16. Гура Д. А. Применение технологий искусственного интеллекта в кадастре и геодезии: современное состояние и перспективы. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 1. С. 126–136. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-126-136.

REFERENCES

1. Klaassen, R., Hellendoorn, H., Bossen, L. (2024). Transforming Engineering Education in Learning Ecosystems for Resilient Engineers. *IEEE Transactions on Education*, 67, 44-55. DOI 10.1109/TE.2023.3303364

2. Nelson, R., Marone, V., Garcia, S., Yuen, T., Bonner, E., Browning, J. (2021). Transformative Practices in Engineering Education: The Embedded Expert Model. *IEEE Transactions on Education*, 64, 187-194. DOI 10.1109/TE.2020.3026906
3. Karpik, A. P., Seredovich, S. V., Ganagina, I. G. (2019). Problems of development of the main professional educational program of the higher education in the field of 21.03.03 Geodesy and remote sensing (bachelor degree) according to FGOS 3++ taking into account professional standards. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 248-256. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-2-248-256 [in Russian]
4. Martynov, G. P., Yankelevich, S. S. (2018). Optimization Activities of the Scientific and Teaching Staff with the Introduction of Professional Standards in the Universities of the Russian Federation. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 267-278. [in Russian]
5. Gunderson, K., Holmes, R., Loisel, J. (2020). Recent Digital Technology Trends in Geoscience Teaching and Practice. *GSA Today*, 30, 39-41. DOI <https://doi.org/10.1130/gsatg404gw.1>
6. Rozhi, I., Udovenko, I., Dorozhko, Y. (2024). The use of geodetic data in the development of virtual and pre-reality for training and simulations. *Spatial development*, 9, 279-290. DOI 10.32347/2786-7269.2024.9.279-290
7. Morkovin, V. A., Penkov, V. A., Storodubtseva, T. N. (2024). Geodetic aspect in information modeling of structures. In *Materials of the National Scientific and Practical Conference «Circular economy for the purpose of sustainable development of industries and territories»* (pp. 254-260). FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov DOI 10.58168/CIRCULAR2024_254-260
8. Dudnik, A., Tupoleva, G. (2021). Game as a scientific and methodological basis of modern geodetic education. *E3S Web of Conferences*, 281, 05006. DOI 10.1051/e3sconf/202128105006
9. Ervin, S. M. (2016). Technology in geodesign. *Landscape and Urban Planning*, 156, 12-16. DOI 10.1016/J.LANDURBPLAN.2016.09.010.
10. Solnyshkova, O. V. (2021). Electronic educational resources during the conduct of a business game within the framework of geodesic practice. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii: T. 1. Aktual'nye voprosy obrazovaniya. Model' problemno-orientirovannogo proektnogo obuchenija v sovremennom universitete [Proceeding of the International Scientific and Methodological Conference: Vol. 1. Current Issues in Education. A Problem-Oriented Project-Based Learning Model in the Modern University]* (pp. 170-172). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian]
11. Dudysheva, E. V., Solnyshkova, O. V. (2020). Hybrid environments for training engineering students the basics of working with geodetic equipment. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Serija: Informatizacija obrazovaniya [RUDN Journal of Informatization in Education]*, 17(2), 94-106. DOI 10.22363/2312-8631-2020-17-2-94-106 [in Russian]
12. Solnyshkova, O. V., Grigoriev, D. O. (2022). Development of Electronic Simulators for Geodetic Instruments to Expand the Possibilities of Distance Learning. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii: T. 2. Aktual'nye voprosy obrazovaniya. Paritet tradicionnogo i cifrovogo obrazovaniya v vuze: priority, akcenty, luchshie praktiki [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference: Vol. 2. Current Issues in Education. The Balance of Traditional and Digital Education in University: Priorities, Emphases, Best Practices]*, (pp. 87-90). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian]
13. Maksimenko, L. A., Tanygina, E. A., Kalyuzhin, V. A. (2018). Application of program products «Autodesk» in teaching students with the «Land management and cadastre» program. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 240-249. [in Russian]
14. Bugakova, T. Yu., Sharapov, A. A. (2021). Application of AI systems for solving problems in the field of geospatial technologies and remote sensing. In *Sbornik materialov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii: T. 1. Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoe i geoprostранственное obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya [Proceedings of the National Scientific and Practical Conference: Vol. 1. Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, and Technological Solutions]* (pp. 163-168). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian]
15. Pang, B., Zheng, Z., Wang, G., Wang, P. (2023). Learning the Geodesic Embedding with Graph Neural Networks. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 42(6), 1-12. DOI 10.1145/3618317

16. Gura, D. A. (2025). Application of artificial intelligence in geodesy: current state and prospects. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30(1), 126-136. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-126-136 [in Russian]

Об авторах

Владимир Владимирович Ознамец – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геодезии.

Маргарита Васильевна Рязанцева – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры психологии и развития человеческого капитала.

Алла Олеговна Субочева – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры психологии и развития человеческого капитала.

Елена Сергеевна Якушова – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры стратегического и инновационного развития.

Author details

Vladimir V. Oznamets – D. Sc., Associate Professor, Head of the Geodesy Department.

Margarita V. Ryazantseva – PhD, Associate Professor, Department of Psychology and Human Capital Development.

Alla O. Subocheva – PhD, Associate Professor, Department of Psychology and Human Capital Development.

Elena S. Yakushova – PhD, Associate Professor, Department of Strategic and Innovative Development.

Получено / Received 13.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 23.12.2025

Принята к публикации / Accepted 05.01.2026