

Издается
Московским
государственным
университетом
геодезии
и картографии
(МИИГАиК)
с 2008 года

e-ISSN 2782-6678

Published by
MIIGAiK since 2008

Пространственные данные: наука и технологии

Spatial Data: Science, Research and Technology

16 | 02 | 2025

Научное издание
Московского государственного университета
геодезии и картографии (МИИГАиК)

Пространственные данные: наука и технологии

Scientific peer-reviewed journal
"Spatial Data: Science, Research and Technology"

16 | 02 | 2025

Москва, Россия
Moscow, Russia

О журнале

ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ

Научный журнал «Пространственные данные: наука и технологии»

СОКРАЩЕННОЕ НАЗВАНИЕ

«Пространственные данные: наука и технологии»

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАЗВАНИЕ

Spatial Data: Science, Research and Technology

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ

геодезия, геоинформатика, картография, землеустройство, кадастр, мониторинг земель, геоэкология, геофизика, маркшейдерское дело, горнопромышленная и нефтегазопромышленная геология, системный анализ, машинное обучение, искусственный интеллект

УЧРЕДИТЕЛЬ, ИЗДАТЕЛЬ

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

ЛИЦЕНЗИЯ

материалы журнала распространяются в открытом доступе по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

СТРАНА, ГОРОД

Россия, Москва

ДАТА ОСНОВАНИЯ

2008 год

ПЕРИОДИЧНОСТЬ

4 выпуска в год

ЯЗЫКИ

русский язык
(полнотекстовая версия),
английский язык (метаданные)

e-ISSN

2782-6678

ВЕБ-САЙТ

www.miigaik.ru/journal

СВИДЕТЕЛЬСТВО О СМИ

серия Эл № ФС77-85558
(сетевое СМИ)

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

РИНЦ
(НЭБ eLIBRARY.RU)

About the journal

INTERNATIONAL TITLE

Spatial Data: Science, Research and Technology

SUBJECT AREAS

Geodesy, geoinformatics, cartography, land management, cadastre, land monitoring, geoecology, geophysics, mining and oil and gas geology, system analysis, machine learning, artificial intelligence

FOUNDED AND PUBLISHED BY

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)

LICENSE

The material is published on the basis of Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

INDEXING

Russian Science Citation Index
(Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU)

LOCATION

Moscow, Russia

ESTABLISHED IN

2008

FREQUENCY

quarterly scientific journal

LANGUAGES

Russian (main text),
English (metadata)

e-ISSN

2782-6678

WEBSITE

www.miigaik.ru/journal

Редакционная коллегия

Редакция

Служба редакционно-издательской деятельности и наукометрии

Выпускающий редактор:

Фомина Н.В.

Научный редактор:

Шишкина М.В.

Технический редактор:

Журавлева Е.Д.

Компьютерная верстка:

Журавлева Е.Д.

Дизайн-макет:

Леднёва С.В.

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»

Адрес

105064, Москва,
Гороховский пер., 4

е-mail:

info@spacejournal.ru

Подписано в печать

29.08.2025

Гарнитура Ubuntu.

© МИИГАиК

Главный редактор

Камынина Надежда Ростиславовна

д-р экон. наук (Москва, Россия)

Заместитель главного редактора

Матерухин Андрей Викторович

д-р техн. наук (Москва, Россия)

Атаманов Сергей Александрович д-р техн. наук (Москва, Россия)

Ашихмина Тамара Яковлевна д-р техн. наук (Киров, Россия)

Братков Виталий Викторович д-р геогр. наук (Москва, Россия)

Булаева Нуржаган Маисовна д-р техн. наук (Махачкала, Россия)

Воробьёв Андрей Владимирович д-р техн. наук (Уфа, Россия)

Воробьёва Гульнара Равилевна д-р техн. наук (Уфа, Россия)

Вшивкова Ольга Владимировна д-р техн. наук (Москва, Россия)

Гайрабеков Ибрагим Гиланиевич д-р техн. наук (Грозный, Россия)

Гарбук Сергей Владимирович канд. техн. наук (Москва, Россия)

Григорьев Сергей Александрович д-р техн. наук (Москва, Россия)

Гусев Владимир Николаевич д-р техн. наук (С.-Петербург, Россия)

Кашников Юрий Александрович д-р техн. наук (Пермь, Россия)

Колоденкова Анна Евгеньевна д-р техн. наук (Самара, Россия)

Кулагин Владимир Петрович д-р техн. наук (Москва, Россия)

Малинников Василий Александрович д-р техн. наук (Москва, Россия)

Пененко Алексей Владимирович д-р техн. наук (Новосибирск, Россия)

Розенберг Игорь Наумович д-р техн. наук (Москва, Россия)

Сугаипова Лейла Супьяновна д-р техн. наук (Москва, Россия)

Темкин Игорь Олегович д-р техн. наук (Москва, Россия)

Сученко Владимир Николаевич д-р техн. наук (Москва, Россия)

Ульянов Сергей Викторович д-р физ.-мат. наук (Дубна, Россия)

Editorial Board

Editorial Office

Department of Editorial
and Publishing Activities
and Scientometrics

Project Management by:

Nina V. Fomina

Edited by:

Mariya V. Shishkina

Illustrations by:

Ekaterina D. Zhuravlyova

Layout design by:

Svetlana V. Ledneva

Computer layout by:

Ekaterina D. Zhuravlyova

Cover design by:

Svetlana V. Ledneva

Founded and published by

Moscow State University
of Geodesy and Cartography

Address

4, Gorokhovskiy pereulok,
Moscow, Russia, 105064

e-mail:

info@spacejournal.ru

Published:

29.08.2025

Font family: Ubuntu

© MIIGAIK

Editor-in-Chief

Nadezhda R. Kamynina
DSc (Moscow, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

Andrei V. Materukhin
DSc (Moscow, Russia)

Tamara Ya. Ashikhmina DSc (Kirov, Russia)

Sergey A. Atamanov DSc (Moscow, Russia)

Vitaly V. Bratkov DSc (Moscow, Russia)

Nurzhagan M. Bulaeva DSc (Makhachkala, Russia)

Ibragim G. Gairabekov DSc (Grozny, Russia)

Sergey V. Garbuk PhD (Moscow, Russia)

Sergey A. Grigoriev DSc (Moscow, Russia)

Vladimir N. Gusev DSc (Saint-Petersburg, Russia)

Yuriy A. Kashnikov DSc (Perm, Russia)

Anna E. Kolodenkova DSc (Samara, Russia)

Vladimir P. Kulagin DSc (Moscow, Russia)

Vasiliy A. Malinnikov DSc (Moscow, Russia)

Alexey V. Penenko DSc (Novosibirsk, Russia)

Igor N. Rozenberg DSc (Moscow, Russia)

Vladimir N. Suchenko DSc (Moscow, Russia)

Leyla S. Sugaipova DSc (Moscow, Russia)

Igor O. Temkin DSc (Moscow, Russia)

Sergey V. Ulyanov DSc (Dubna, Russia)

Andrei V. Vorobev DSc (Ufa, Russia)

Gulnara R. Vorobeva DSc (Ufa, Russia)

Olga V. Vshivkova DSc (Moscow, Russia)

Содержание

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

- Редина Ю.Н., Забаева М.Н.** **8**
Экономические аспекты применения беспилотных воздушных судов в кадастровой деятельности

ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

- Бирюков Н.А.** **30**
Влияние состава выборок аэрокосмических изображений ДЗЗ высокого и сверхвысокого пространственного разрешения на обучение и точность нейронных сетей при семантической сегментации геополей на примере распознавания различных классов земной поверхности

ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Соколова Н.В.** **58**
О структурах естественного управления процессами денудации в единой системе транзитных тальвегов

ГЕОДЕЗИЯ

- Филонов Д.Н.** **76**
Рекомендации по методике обработки ГНСС-измерений на основе анализа точности Московской геодезической сети

ГЕОДЕЗИЯ

- Быков Л.В., Пуцак О.Н., Морозова А.А.** **98**
Исследование точности двухъярусной аэрофотосъемки с определением координат центров фотографирования при создании топографических планов по материалам беспилотной аэрофотосъемки

Contents

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

- Redina Y.N., Zabaeva M.N.** **8**
Economic Issues of Using Unmanned Aerial Vehicles in Cadastral Activities

GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY

- Biryukov N.A.** **30**
The Impact of High and Super Spatial Resolution Remote Sensing Images Datasets Composition on Training and Accuracy of Geofields Semantic Segmentation Neural Networks on Example of a Different Earth's Surface Classes Recognition

GEOECOLOGY

- Sokolova N.V.** **58**
On the Structures of Denudation Processes Natural Control in a Unified System of Transit Thalwegs

GEODESY

- Filonov D.N.** **76**
Recommendations on the Methodology for Processing GNSS Measurements Based on the Analysis of the Accuracy of the Moscow Geodetic Network

GEODESY

- Bykov L.V., Pushchak O.N., Morozova A.A.** **98**
Research of the Accuracy of Two-Stage Aerial Photographing with Determination of Coordinates of Photography Centers for Creating Topographic Plans from Unmounted Survey Materials

Экономические аспекты применения беспилотных воздушных судов в кадастровой деятельности

Ю.Н. Редина¹✉, М.Н. Забаева¹

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ jn_redina@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Редина Ю.Н., Забаева М.Н. Экономические аспекты применения беспилотных воздушных судов в кадастровой деятельности // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, № 2. С. 8–29. DOI:10.30533/scidata-2025-16-08.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

беспилотное воздушное судно, экономический аспект, кадастровая деятельность, критерий эффективности, экономический эффект

АННОТАЦИЯ

Развитие современных технологий дает мощный импульс трансформированию кадастровой деятельности и создает новые возможности для повышения ее эффективности. Однако высокая стоимость работ с использованием беспилотных воздушных судов (БВС) делает актуальным вопрос об экономической целесообразности и масштабировании применения последних. Целями исследования стали анализ экономических аспектов и выявление возможностей повышения эффективности кадастровой деятельности при использовании БВС. Были исследованы типы БВС, проанализированы факторы и характеристики, влияющие на принятие решений по применению БВС в кадастровой деятельности. Проведена сравнительная экономическая оценка затратным методом стоимости комплексных кадастровых работ с проведением геодезической съемки территории и с использованием БВС,

установлены экономические эффекты и критерии оценки применения БВС в кадастровой деятельности, а также предложены рекомендации по повышению его эффективности. Результаты исследования подтверждают значительный потенциал использования БВС в кадастровой деятельности, однако требуют решения некоторые вопросы, касающиеся взвешивания выгод и издержек, возможности применения БВС при выполнении задач определенного рода.

1 Введение

Сегодня благодаря расширению возможностей и сферы применения беспилотные авиационные технологии, отличающиеся мобильностью, скоростью и способствующие сохранению человеческого капитала, становятся мощным инструментом, применяемым в кадастровой деятельности для быстрого и точного получения данных, создания цифровых моделей местности, анализа динамики изменений в ландшафте и прочих задач. Данная тенденция предопределена прежде всего активным развитием гражданских беспилотных летательных аппаратов вследствие снижения стоимости электронного обеспечения (систем связи, компьютеров, приемников спутниковой навигации, микромеханических датчиков для инерциальных навигационных систем, фото- и видеоаппаратуры и т. д.) и уменьшения физических размеров, создания следующего поколения двигателей и аккумуляторов, развития программного обеспечения для обработки результатов данных.

Под беспилотным воздушным судном (БВС) в рамках исследования будем понимать такое воздушное судно (летательный аппарат), управление которым и контроль за которым осуществляется внешним оператором, при этом беспилотный летательный аппарат будем считать частной категорией БВС.

Сегодня есть различные классификации БВС: по функциональному назначению, конструктивным особенностям, стабильным параметрам и особенностям технических характеристик (взлетная масса, дальность и высота полета, продолжительность функционирования и габариты) для выполнения различных задач, что предполагает особое функциональное, техническое оснащение и конфигурацию. **К основным типам беспилотников, занимающихся дистанционным мониторингом, сбором и передачей данных, относят:**

- 1) самолетный (классический);
- 2) мультироторный (два и более независимых винта);
- 3) вертолетный (однороторный);
- 4) аэростатический;
- 5) конвертопланы и гибридные модели [1].

Среди общих преимуществ использования БВС выделяют: возможность съемки небольших участков местности; высокое разрешение аэрофотосъемки; полет на низких высотах; проведение аэрофотосъемки в облачную погоду. К числу ограничений можно отнести: полет на небольшие расстояния и на незначительной высоте; короткое время автономной работы, что снижает эффективность аэросъемки; небольшую площадь покрытия; ограничения на полезную нагрузку и размеры оборудования для аэрофотосъемки.

Самолеты пилотируемой авиации, более экономичные и эффективные для аэрофотосъемки больших территорий, позволяют получать снимки с более высоким разрешением (до 3 см на пиксель), меньше ограничены по зонам полета, чем беспилотная авиация, отличаются более высокой дальностью полета и меньшими ограничениями на полезную нагрузку, соответственно, могут нести большие картографические комплексы. Тем не менее в качестве их недостатков можно выделить зависимость от метеоусловий (съемка ведется с больших высот и требует учета облачности), крайне высокую стоимость аэрофотосъемки, привязку к аэропортам. Таким образом, БВС целесообразно использовать на небольших участках местности, а пилотируемая авиация эффективнее на больших территориях, т. к. требует меньших временных затрат.

Использование БВС в кадастровой деятельности может снизить трудоемкость геодезических изысканий и повысить объективность получаемых данных, что особенно важно при выполнении работ, требующих точности от 0,5 м (межевание земель промышленности и сельскохозяйственного назначения).

Геодезические БВС классифицируют:

- по типу конструкции:
 - мультироторные, имеющие больше двух несущих винтов;
 - крылатые;
 - гибридные;
- назначению:
 - картографические;
 - геодезические;
 - линейно-профильные;
 - эксплуатационные;
 - разведочные;
- характеристикам:
 - малой нагрузки;
 - средней нагрузки;
 - дальневыносные [2].

Важно учитывать не только технологические преимущества, но и экономические эффекты этих технологий при оценке целесообразности их внедрения, в частности более эффективного управления ресурсами, результативности, качества выполнения работ и оптимизации затрат.

Инновационные технологии использования БВС сегодня стремительно развиваются (передовые системы навигации, искусственный интеллект, датчики и камеры высокого разрешения). Применение БВС в кадастровых работах охватывает аэрофотосъемку, разработку трехмерных моделей местности и создание подробных карт земельных участков. При проведении аэрофотосъемки с БВС получают цифровые ортофотопланы с привязкой к реальным географическим координатам и внешним базам данных, с наполнением векторными данными. Результаты измерений и полученную пространственную информацию используют для геоинформационных систем (ГИС) и создания цифровых топографических карт и планов.

Аэрофотосъемка БВС имеет общие черты с космической съемкой: БВС не требуют специализированной технической поддержки, могут снимать большие территории и преодолевать большие расстояния, позволяют получать высокоточные изображения и снижают вероятность ошибок в кадастровых записях, делают возможным оперативный мониторинг изменений на земельных участках, что способствует более эффективному управлению земельными ресурсами и планированию территорий.

В целом к преимуществам использования БВС в геодезии можно отнести быстрое получение топографических данных благодаря эффективному программному обеспечению; наличие уникальных методик для анализа данных; высокую точность измерений; применение высокотехнологичного оборудования для точного определения географических координат; создание трехмерных карт местности; получение изображений высокой четкости. Тем не менее сохраняется ряд проблем. В частности, необходимо координировать усилия производителей БВС, пользователей и разработчиков цифровых фотограмметрических систем; определять соответствие границ недвижимого имущества данным с летательных аппаратов; оценивать эффективность использования агроландшафтов и территорий с определенными свойствами; реализовывать возможность прогнозирования развития территорий; выявлять участки земель с заявленными характеристиками и др. [3].

В качестве экономических аспектов внедрения БВС в кадастровую деятельность выделяют следующие.

Во-первых, применение БВС позволяет сократить издержки на выполнение кадастровых работ, уменьшив численность полевых бригад; снизить расходы на транспортировку и проживание сотрудников в труднодоступных районах; свести к минимуму время, затрачиваемое на обследование участков; замедлить износ традиционного геодезического оборудования; минимизировать расходы на традиционные методы аэрофотосъемки и геодезических измерений, которые требуют дорогостоящего оборудования и больших временных затрат (легкие беспилотники со взлетной массой до 30 кг экономически целесообразны благодаря низкой стоимости эксплуатации). В среднем себестоимость кадастровой

съемки при использовании БВС по разным оценкам снижается на 30–50 %, особенно при больших объемах или при работе в удаленных регионах [4].

Во-вторых, повышается производительность труда по сравнению с наземной съемкой, поскольку БВС позволяют за один вылет покрывать десятки (а иногда и сотни) гектаров, обеспечивая высокую точность снимков. Другими словами, наблюдается важный экономический эффект — увеличение производительности в единицу времени при тех же трудозатратах. Например, для участков площадью более 60 гектаров использование БВС более выгодно, чем традиционные методы. На меньших участках экономическая эффективность требует уточнения, но преимущества в скорости и точности сохраняются [4].

В-третьих, использование БВС позволяет уменьшить сроки выполнения работ в два-три раза, что, в свою очередь, ускоряет ввод объектов в оборот; повышает скорость обновления кадастровых данных; дает возможность быстро реагировать на запросы заинтересованных сторон и заказчиков. Это напрямую влияет на эффективность деятельности и снижает финансовые потери из-за задержек.

В-четвертых, высокое разрешение аэрофотоснимков и точные цифровые модели местности уменьшают вероятность ошибок при составлении кадастровых планов, способствуя экономии средств, сокращению дополнительных расходов на переделывание работ; уменьшению числа отказов со стороны Росреестра; снижению судебных и административных издержек и т. д. По сравнению с космической съемкой, которая имеет погрешность 1–10 м, беспилотники обеспечивают высокую точность (до сантиметров), что минимизирует ошибки в кадастровых картах и снижает затраты на их исправление. Данное преимущество особенно актуально в вопросах надзора, выявления самозахватов земли, неиспользуемых территорий и сельхозугодий, неучтенных земельных участков и объектов недвижимости, что потенциально может принести дополнительный доход от налогов, увеличить налоговую базу, получить экономический эффект и повысить результативность принятия решений. По некоторым оценкам, кадастровая стоимость самозахватов земли в России превышает 2 трлн руб., а неиспользуемых сельхозземель — более 1 трлн руб. Их учет увеличивает налоговую базу¹.

В-пятых, БВС в кадастровой деятельности за счет их масштабируемости, мобильности, гибкости и универсальности можно применять как для мелко-масштабной съемки отдельных участков, так и для массового картографирования больших территорий (сельхозугодий, лесного фонда, охранных зон и т. д.), а также для выполнения различных полетных задач, что расширяет возможности взаимодействия с различными акторами и категориями заказчиков, влияет на увеличение доходной части при умеренном увеличении издержек. Кроме того, снижаются риски и затраты, связанные с вопросами безопасности и работы

¹ Семёнов А. Как применять беспилотники в кадастровых работах // Агентство стратегических инициатив. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://asi.ru/sml/111504/> (дата обращения: 17.05.2025).

в труднодоступных или опасных районах, уменьшаются убытки от несчастных случаев, страховых выплат и простоя техники.

Выполнение геодезических работ традиционными методами подразумевает работу с измерительными инструментами, которые требуют аккуратной установки оборудования, нивелирования и подбора точек измерений, что увеличивает рабочее время, затраченное на подготовительный этап. На больших объектах требуется частое перемещение, ручное измерение, что довольно трудоемко и трудозатратно. Соответственно, увеличивается сметная стоимость работ, появляются дополнительные издержки и риски. Использование БВС обеспечивает преимущество в скорости и эффективности выполнения работ, расширяя их охват и автоматизацию данных за короткий промежуток времени, сокращая время и стоимость работ.

Вопрос оценки затрат неоднозначен при сравнении проведения работ традиционным методом и с использованием БВС, поскольку традиционные методы включают расходы на приобретение и обслуживание специализированного оборудования, стоимость обучения квалифицированных специалистов, транспортировку и установку оборудования на месте работ. Затраты при использовании БВС могут быть существенными из-за стоимости самого беспилотного аппарата, необходимости дополнительного оснащения (камеры высокого разрешения, ГНСС-приемники и программное обеспечение для обработки данных), тем не менее в долгосрочном периоде можно обеспечить снижение общих затрат за счет уменьшения времени выполнения работ, эффекта масштаба, снижения рисков ошибок измерений [5].

Таким образом, в целом экономические эффекты от внедрения БВС в кадастровую деятельность являются многоуровневыми и комплексными. Они связаны не только с сокращением прямых затрат, но и с увеличением положительного финансового результата за счет повышения производительности, качества услуг и скорости выполнения заказов, повышения устойчивости развития кадастровой деятельности.

2 Материалы и методы

Основу исследования составили выборка аналитических отчетов, докладов, публикаций, документов развития беспилотных летательных аппаратов (БВС) и опыт их применения в кадастровой деятельности. Вопросы экономического анализа выстраивались вокруг комплексного исследования экономической целесообразности и экономических эффектов (в том числе долгосрочных) использования БВС в кадастровой деятельности с учетом как прямых, так и косвенных экономических выгод, оценки затрат, включая влияние

данной технологии на производительность, точность и стоимость кадастровых работ; сравнение стоимости кадастровых работ, выполненных традиционным методом и с применением БВС.

Методологию работы составили эмпирические и теоретические методы познания, системно-аналитический метод, метод интерпретации, экспертной оценки, структурирования, сравнительный метод при сопоставлении результатов экономического анализа стоимости комплексных кадастровых работ с проведением геодезической съемки территории и использованием БВС на территории населенного пункта д. Малый Корчуган (Топкинский муниципальный округ, Кемеровская область — Кузбасс) площадью 1,4 км² (400 объектов недвижимости) и в целом междисциплинарный подход к исследованию. Практическая часть включала в себя проведение аэрофотосъемки с помощью БВС DJI Phantom 4 RTK, ГНСС-приемников (PrinCe i30, PrinCe i50, PrinCe i90) и современного программного обеспечения. Аэрофотоснимки получены с помощью камеры FC6310R (8.8 мм) с размером проекции пикселя на местности 0,03 м с продольным и поперечным перекрытиями 65–70 %, что соответствует установленным требованиям. Обработка полученных фотографий проводилась в программе Agisoft Metashape.

Были определены экономические составляющие и перечень основных затрат для выводов об экономической целесообразности использования БВС в кадастровой деятельности, выявлены ключевые характеристики, а также факторы, влияющие на работу с БВС в кадастровой деятельности. Использовались метод анализа посредством издержек и выгод, затратный метод при расчете выполнения кадастровых работ с применением БВС и традиционным способом при одинаковом уровне качества, SWOT-анализ.

Этапы исследования включали анализ текущих процессов развития и применения БВС в кадастровой деятельности, определение критериев оценки эффективности применения БВС; анализ эффектов, рисков, возможностей и ограничений, формулирование выводов и рекомендаций по использованию БВС для достижения положительных экономических эффектов.

3 Результаты и обсуждение

Как уже было отмечено выше, преимущества и эффективность использования БВС в кадастровой деятельности зависят от многих факторов и параметров, которые могут затруднять, ограничивать применение данного метода или даже делать его нецелесообразным. Условно все факторы, влияющие на внедрение БВС в кадастровую деятельность, можно разделить на следующие группы: технические, организационные, экономические, социальные и природно-экологические (рис. 1).

Рис. 1 Факторы, влияющие на использование БВС в кадастровой деятельности

Fig. 1 Factors affecting the use of UAVs in cadastral activities



Крайне важно тщательно анализировать все факторы, сравнивая затраты на использование БВС и на альтернативные методы выполнения поставленных задач и условий проведения комплексных кадастровых работ.

Если обобщать, то для проведения кадастровой деятельности основными статьями расходов являются:

- оплата труда сотрудников (заработная плата кадастровых инженеров, геодезистов, картографов и других специалистов, участвующих в проведении кадастровых работ, с учетом обязательных отчислений);
- расходы на оборудование и материалы для проведения кадастровых работ;
- транспортные расходы (закупка автомобилей, затраты на топливо, расходы, связанные с транспортировкой специалистов и оборудования к месту проведения работ);
- расходы на аренду помещений — офисов, складов, гаражей и других помещений, используемых для хранения оборудования и материалов;
- расходы на связь и интернет для работы с геодезическим оборудованием и обмена информацией;
- страховые расходы (затраты на страхование оборудования, ответственности, здоровья специалистов и других возможных рисков, связанных с проведением кадастровых работ);
- маркетинговые расходы;
- расходы на обучение персонала и повышение квалификации;
- прочие расходы, связанные с текущей операционной деятельностью.

Перечень может варьироваться в зависимости от специфики и объема проводимых работ.

Комплекс вопросов, который связан с принятием решений относительно использования БВС в кадастровой деятельности и позволяет сформировать **экономическое обоснование, в общем виде выглядит следующим образом:**

1. Первоначальные капитальные вложения — это закупка БВС и оборудования (собственно БВС, камеры, ГНСС-приемники, станции базовой коррекции и т. д.), расходы на программное обеспечение (лицензии на фотограмметрические и ГИС-программы), обслуживание и страхование техники. Здесь экономическая оценка в первую очередь связана с анализом окупаемости инвестиций в рамках предполагаемого объема кадастровых работ. Оценка и затраты зависят от модели, функциональности, производителя оборудования. Например, при использовании квадрокоптера модели DJI Phantom 4 RTK на выполнение аэрофотосъемки площадью 4,92 км² уйдет 270 минут полетного времени. Таким образом, для выполнения работ по съемке необходимо 2 рабочих дня с учетом зарядки и времени полета за раз. При использовании БВС самолетного типа модели «Геоскан 201» все авиационные работы можно выполнить за один взлет и один рабочий день. Однако стоимость БВС «Геоскан 201» существенно выше стоимости квадрокоптера DJI Phantom 4 RTK. Состав поставок может различаться и напрямую влияет на конечную стоимость.
2. Отдельно оцениваются затраты на оплату труда специалистов, связанных с кадастровой деятельностью, обработкой и передачей полученных материалов заинтересованным сторонам, а также задействованных на всех этапах проведения работ. Кроме того, в смете следует учесть издержки на закупку как геодезического оборудования для проведения наземных работ по координированию контрольных и опорных точек, так и программного обеспечения для обработки геодезической съемки, наземные работы по обследованию геодезической основы, установке и координированию пункта съёмочного обоснования².
3. Затраты на обучение персонала предполагают оплату обучения пилотов БВС (включая сертификацию), повышения квалификации сотрудников в области обработки аэросъёмочных данных и др. Иными словами, речь идет об инвестициях в человеческий капитал.
4. Эксплуатационные затраты связаны с текущим техническим обслуживанием, ремонтом, заменой деталей и фондом оплаты труда соответствующих специалистов.
5. Дополнительные затраты включают получение разрешений и лицензий на использование БВС, соблюдение безопасности и охраны окружающей среды, штрафы за нарушение законодательства.

² Забаева М.Н. Экономика кадастровой деятельности: учебник. М.: КноРус, 2022. 376 с.

6. Операционные расходы — это расходы на командировки, если съемка проводится вне основного местоположения компании; страхование полевых работ и соблюдение требований авиационного законодательства.
7. Учитываются также амортизация и потребность регулярного обновления оборудования и программного обеспечения, т. е. при анализе оценивается срок эффективного использования оборудования до морального устаревания и снижения производительности.

Эффективность применения БВС зависит от себестоимости одного квадратного километра съемки. В этом контексте важны регулярность и объем выполняемых работ, поскольку простои будут снижать экономическую отдачу. Необходимо оценивать целесообразность применения того или иного метода и выбирать наиболее эффективное решение при реализации конкретного проекта (например, на очень сложных участках более рациональной иногда может быть наземная съемка). Другими словами, следует проводить тщательный анализ сравнения затрат с применением наземных геодезических работ и с использованием БВС, принимать решение в каждой отдельной ситуации. Этот фактор ограничивает возможность масштабируемости и универсализации применения БВС, а соответственно, требует разработки универсальных индикаторов комплексного анализа и создания автоматизированной модели для принятия решений об альтернативном подходе, учитывая экономические параметры. Правовые и административные барьеры, которые приводят к возникновению дополнительных издержек и бюрократических сложностей, также могут влиять в совокупности на экономические показатели и себестоимость проведения комплексных кадастровых работ. В целом экономика выстраивается вокруг оценки рентабельности, сроков окупаемости и потенциальных экономических эффектов, рисков и непредвиденных расходов вследствие сбоя или неудачного полета, утраты, повреждения, несоответствия качества данных требованиям, штрафов.

Таким образом, экономические критерии, лежащие в основе решения о целесообразности использования БВС, включают:

- 1) снижение затрат на выполнение работ по сравнению с традиционными методами; сокращение трудозатрат вследствие автоматизации сбора данных (уменьшение потребности в большом количестве полевых работников и снижение расходов на оплату труда);
- 2) сокращение времени сбора данных на больших территориях;
- 3) параметры точности и качества данных (снижение вероятности ошибок в кадастровых данных и дополнительных расходов на исправление ошибок измерений);
- 4) уменьшение эксплуатационных расходов, затрат на обслуживание и ремонт, а также срок службы БВС (влияние на окупаемость инвестиций);
- 5) снижение логистических затрат на транспортировку и подготовку к работам, особенно в труднодоступных районах;

- 6) экономия за счет масштабируемости объемов работ и оптимизация затрат в зависимости от размера и сложности проекта;
- 7) возможность получения добавленной стоимости, в том числе за счет быстрого оказания услуг и одновременного оказания дополнительных услуг;
- 8) необходимость закладывать риски из-за технических сбоев и страхования от повреждения и потерь³.

Окончательный вывод об использовании БВС в каждой отдельной группе проектов кадастровых работ необходимо принимать, исходя из оценки экономической целесообразности, если затраты на приобретение и эксплуатацию летательного аппарата компенсируются сокращением времени, трудозатрат и повышением качества данных. Для точной оценки необходимо учитывать специфику региона, типы задач и регуляторные ограничения.

SWOT-анализ экономических эффектов применения БВС в кадастровой деятельности позволяет оценить сильные и слабые стороны технологии, а также возможности и угрозы, связанные с ее внедрением.

В качестве сильных сторон можно обозначить:

- снижение затрат в два–три раза;
- высокую скорость выполнения работ (съемка больших территорий за короткое время, например 500 га за 3–5 дней вместо 20 дней при наземной съемке);
- высокое разрешение съемки за счет малой высоты полета, сканирования и детального отображения объектов и особенностей рельефа;
- оперативность процесса съемки (точность данных при погрешности 2–5 см с меньшими затратами времени);
- высокая реалистичность 3D-моделей;
- гибкость применения (использование в труднодоступных местах — горах, лесах, болотах) и различных масштабов проектов;
- простоту транспортировки до места исследования;
- снижение рисков для персонала (отсутствие необходимости работать в опасных или труднодоступных зонах);
- экологическая безопасность за счет использования электрических двигателей.

К слабым сторонам технологии относятся:

- высокие первоначальные затраты (приобретение БВС, датчиков, камер, программного обеспечения и обучение персонала, при этом стоимость оборудования прямо пропорциональна качеству съемки и работы);
- ограниченное время полета и потребность перезарядки (замедление работы на больших территориях);
- зависимость от погодных и климатических условий;

³ Забаева М.Н. Экономика кадастровой деятельности: учебник. М.: КноРус, 2022. 376 с.

- необходимость обучать операторов и специалистов по обработке данных (увеличение финансовых затрат и времени на внедрение технологии);
- потребность в мощных вычислительных ресурсах и времени на обработку больших объемов данных.

В качестве возможностей использования БВС сегодня выделяют:

- перспективы интеграции с современными технологиями (с искусственным интеллектом, машинным обучением, технологиями распознавания границ и объектов на ортофотопланах, с ГИС — для создания высокоточных кадастровых карт);
- применение не только для съемки, но и для мониторинга изменений земель, инвентаризации объектов и управления природными ресурсами;
- потенциальный рост рынка БВС и снижение стоимости оборудования и программного обеспечения;
- высокую окупаемость инвестиций за счет многократного использования БВС в различных проектах (до 200 % за год).

Среди рисков и угроз рассматриваемой технологии можно назвать:

- регуляторные ограничения и правила использования воздушного пространства, необходимость получения летного разрешения и согласования;
- поломка и утеря оборудования, сбои программного обеспечения, быстрое моральное устаревание оборудования и программного обеспечения;
- расходы на обслуживание;
- ограниченный выбор производителей БВС, комплектующих и оборудования;
- возможную утечку данных.

Таким образом, тщательный анализ экономических составляющих использования БВС и потенциальных рисков поможет избежать неоправданных расходов и выбрать наилучшую стратегию для тех или иных видов работ [6, 7].

Исследование включало сравнительную оценку применения БВС при выполнении комплексных кадастровых работ традиционным методом наземной геодезии и с применением БВС. Для расчетов была взята стоимость проведения комплексных кадастровых работ с геодезической съемкой на конец 2024 года на территории населенного пункта д. Малый Корчуган (Топкинский муниципальный округ, Кемеровская область — Кузбасс) площадью 1,4 км² (400 объектов недвижимости — определение координат на 200 земельных участков и 200 объектов капитального строительства). Результаты представлены в **табл. 1**.

Можно сделать промежуточный вывод о том, что проведение комплексных кадастровых работ с применением БВС является более выгодным по сравнению с наземными геодезическими работами. Кроме того, авиационные работы на территорию населенного пункта были выполнены за 2 дня, а наземная съемка такого количества объектов может занять несколько недель. Таким образом, очевидно преимущество применения БВС в данном случае.

Таблица 1 Проведение комплексных кадастровых работ с использованием геодезической съемки и БВС

Table 1 Carrying out complex cadastral works with geodetic survey and an UAV

Метод выполнения комплексных кадастровых работ	Объекты	Тип работ	Цена без НДС, руб.	Стоимость с учетом НДС, руб.	Полная стоимость работ с учетом НДС, руб.
Наземная геодезическая съемка	Земельные участки (200 объектов)	Изготовление межевого плана по уточнению границ земельного участка	10 000 за 1 объект	2 400 000	4 320 000
	Объекты капитального строительства (200 объектов)	Изготовление технического плана	от 8000 за 1 объект	1 920 000	
Использование БВС	Земельные участки (200 объектов)	Аэрофотосъемка	от 35 000 за 1 км ²	109 200	2 869 200
		Создание ортофотоплана с масштабом 1 : 500	от 30 000 за 1 км ²		
	Объекты капитального строительства (200 объектов)	Отрисовка топографического плана по результатам съемки БВС (векторизация)	от 5000 за 1 гектар	840 000	
		Изготовление схемы	от 4000 за 1 объект	1 920 000	

Примечание. При расчете полной стоимости комплексных кадастровых работ с использованием БВС не учитывались расходы на проведение геодезической съемки.

Следующим важным вопросом оценки экономических эффектов является анализ себестоимости проведения аэрофотосъемки в зависимости от технических параметров БВС, когда качественные характеристики переводятся в количественные значения и вносят вклад в расчет себестоимости и эффективности. Важные характеристики, которые могут быть учтены при анализе, можно разделить на следующие группы:

- 1) технические характеристики аэрофотосъемочных комплексов:
 - скорость полета (км/ч);
 - максимальная продолжительность полета (ч.);
 - стоимость аэрофотосъемочного оборудования, включая ТО (тыс. руб.);

- максимальная высота аэрофотосъемки (м);
 - фокусное расстояние фотокамеры (мм);
 - физический размер пикселя (мм);
 - поперечный угол поля зрения;
 - максимальное число снимков за вылет;
- 2) параметры съемки для различных аэрофотосъемочных комплексов:
- продольное перекрытие (%);
 - минимально допустимое поперечное перекрытие (%);
 - эффективный угол поля зрения (часть поперечного угла поля зрения, ограничивающая используемую для ортофотоплана часть снимка);
 - время на разворот (мин.);
 - стоимость часа летного времени (тыс. руб.);
 - удаление от места постоянного базирования (км);
 - число базисов за пределами участка съемки;
 - среднее удаление от места временного базирования (км);
 - отношение числа нелетных дней к числу съемочных дней;
 - продолжительность паузы между вылетами (ч.);
- 3) структура затрат на выполнение всего объема работ по созданию ортофотоплана в зависимости от типа БВС и фотокамеры:
- количество снимков;
 - количество вылетов;
 - количество съемочных дней;
 - продолжительность съемочного дня;
 - амортизация оборудования (тыс. руб.);
 - аренда самолета на перелет и подлет (тыс. руб.);
 - аренда аппарата для аэрофотосъемки (тыс. руб.);
 - зарплата и командировочные расходы (тыс. руб.);
 - привязка опознаков (тыс. руб.);
 - фотограмметрическая обработка (тыс. руб.);
 - стоимость одного рабочего дня исполнителя, включая накладные расходы (тыс. руб.);
 - транспортные расходы во время выполнения работ (тыс. руб.);
 - число исполнителей, включая специалиста на наземной базовой станции ГНСС.

В 2017 году сотрудники Центра геодезии, картографии и ИПД Н.М. Бабашкин, С.А. Кадничанский, С.С. Нехин выполнили экспериментальный расчет⁴ себестоимости создания ортофотоплана масштаба 1:2000 условного объекта

⁴ Бабашкин Н.М., Кадничанский С.А., Нехин С.С. Сравнение эффективности аэрофототопографической съемки с использованием беспилотных и пилотируемых авиационных систем. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russiandrone.ru/publications/sravnienie-effektivnosti-aerofototopograficheskoy-semki-s-ispolzovaniem-besplotnykh-i-pilotiruemykh/> (дата обращения: 17.05.2025).

площадью 15 000 км² с использованием самолета АН-30, БВС с электродвигателем и максимальным временем полета 1 час и 5 часов и БВС с бензиновым двигателем. Анализ показал, что самой экономически выгодной будет аэрофотосъемка БВС с бензиновым двигателем. Затем следует аэрофотосъемка самолетом АН-30 и БВС с электродвигателем. Самой дорогостоящей является аэрофотосъемка БВС, оснащенного электродвигателем, с продолжительностью полета 1 ч. Для аккуратности расчетов необходимо сделать поправку на сопоставимость рыночных цен и индексацию цен в текущем периоде, тем не менее порядок расчетов очевиден. Таким образом, на данный момент самым эффективным способом проведения аэрофотосъемки больших площадей является пилотируемая авиация ввиду редкого применения БВС с бензиновым двигателем в силу объективных причин.

4 Выводы

Применение БВС в кадастровой деятельности сегодня является инновационным подходом к ее развитию, позволяя радикально трансформировать классические методы работы, повысить качество и сократить стоимость процессов, что подтверждает значимость использования данной технологии при сборе геодезической информации.

Оценка экономической эффективности применения БВС в кадастровой деятельности основывается на сравнении издержек, рисков и выгод (экономия времени, снижение затрат, повышение качества и точность снимков; стоимость и время выполнения топографической съемки / аэрофотосъемки с использованием БВС, пилотируемой авиации и наземных методов, эффекты от автоматизации процессов и экономии трудовых ресурсов; оценка производственных затрат — себестоимость летного часа БВС, включая амортизацию оборудования, расходы на операторов и программное обеспечение; влияние технических характеристик на экономику и результативность работ с учетом веса, полезной нагрузки и энергопотребления БВС, что определяет длительность полета и объем собираемых данных). Экономическая эффективность также зависит от качества получаемых данных: БВС позволяют создавать детальные 3D-модели, ортофотопланы и цифровые карты местности с высоким разрешением, что снижает необходимость повторных съемок, тем самым оптимизируя затраты. Кроме того, для качественного анализа рассчитывается возврат инвестиций через соотношение затрат на внедрение БВС и экономии от их использования (например, сокращение времени на съемку, снижение расходов на персонал и оборудование), что особенно актуально для крупных проектов. Для максимальной эффективности необходимо учитывать тип БВС, техническое задание и условия эксплуатации.

На основании проведенного исследования можно подтвердить высокую эффективность и существенные преимущества использования БВС в кадастровой деятельности. Эта технология предлагает ряд инноваций, улучшающих качество предоставления услуг, оптимизирует рабочие процессы, повышая точность данных и своевременность их получения при принятии решений. Важно, однако, учитывать ограничения использования БВС, высокую стоимость и дополнительные затраты на обслуживание, потребность в обновлении оборудования, программного обеспечения и в обучении специалистов. Тем не менее при оценке долгосрочных эффектов выгоды от внедрения БВС могут включать снижение затрат на труд, повышение производительности и качества выполнения работ, дополнительные экономические эффекты и в целом обеспечивать устойчивость и высокоэффективность развития кадастровой деятельности.

С целью повышения экономической эффективности применения БВС можно предложить следующее:

- задействовать аппараты с оптимальным соотношением цены и качества, подходящие для конкретных задач (например, мультикоптеры — для небольших участков, БПЛА с фиксированным крылом — для больших территорий);
- использовать программное обеспечение для автоматической обработки данных с целью сокращения времени на анализ и моделирование;
- автоматически планировать полеты с помощью специальных приложений, чтобы минимизировать ошибки и время на подготовку;
- выбирать камеры и сенсоры с учетом требуемой точности данных и бюджета;
- инвестировать в обучение операторов БВС и обеспечивать непрерывное повышение квалификации, использовать симуляторы для тренировок, чтобы сократить затраты на практические вылеты;
- проводить аудит эксплуатационных затрат и мероприятия по их снижению (регулярное техническое обслуживание для предотвращения поломок и продления срока службы, использование аккумуляторов с высокой емкостью и оптимизация маршрутов полетов для экономии энергии);
- масштабировать задачи — применять БВС для выполнения нескольких задач одновременно (например, топографическая съемка, мониторинг объектов, создание 3D-моделей), чтобы максимизировать отдачу от одного вылета, а также в проектах с высокой добавленной стоимостью;
- повышать доступность технологий за счет снижения стоимости оборудования, масштабирования производства и конкуренции на рынке;
- проводить гибкую ценовую политику — развивать механизмы аренды БВС и предложения БВС как услуги для заказчиков с ограниченным бюджетом;
- обеспечивать интеграцию БВС с другими технологиями: например, с наземными геодезическими измерениями (ГНСС, тахеометры) — для повышения точности и сокращения времени обработки; с цифровыми

платформами — для хранения и обработки данных в целях снижения затрат на локальную инфраструктуру;

- оптимизировать расходы на оборудование: для разовых или редких проектов арендовать, а не покупать БВС, чтобы снизить капитальные затраты;
- заранее получать разрешения на полеты и соблюдать местное законодательство, чтобы избежать штрафов и простоев; использовать сертифицированные БВС, соответствующие стандартам безопасности и экологической устойчивости;
- анализировать успешные кейсы применения БВС, чтобы внедрять лучшие практики и расширять набор услуг, предлагая комплексные решения, а также разрабатывать маркетинговую политику, в том числе повышая осведомленность потенциально заинтересованных сторон (демонстрировать экономическую выгоду посредством публикации исследований и отчетов);
- использовать БВС для быстрого сбора данных на труднодоступных территориях, сокращая затраты на выезды геодезических бригад;
- применять БВС с низким энергопотреблением для минимизации экологического следа, руководствуясь социальной и экологической ответственностью;
- расширять сотрудничество между производителями БВС, геодезическими компаниями и государственными учреждениями для совместных проектов;
- разрабатывать поддерживающие финансовые механизмы для внедрения БВС в кадастровую деятельность, в том числе для закупки оборудования и обучения [8, 9].

На сегодняшний день существует ряд законодательных ограничений, препятствующих массовому использованию БВС [10]. **Тем не менее в качестве нормативных мероприятий по распространению использования БВС в кадастровой деятельности для достижения положительных экономических эффектов можно предложить:**

- упростить процедуры согласования авиационных работ с БВС и передачи аэрофотосъемки на контрольный просмотр;
- создать на государственном уровне защищенные облачные сервисы для передачи данных, повысить грамотность специалистов;
- разграничивать допустимые высоты для разного вида деятельности с использованием БВС, что позволит упростить процедуры согласования (например, разграничить цели аэрофотосъемки на специально определенных высотах и характеристиках);
- внедрить инновационные решения для автоматизации обработки данных;
- признать БВС средством измерения с требованием прохождения поверки, что способствовало бы уменьшению количества наземных геодезических работ для аэрофотосъемки.

Развитие конкуренции на рынке БВС (в том числе отечественных БВС и компонентов) может способствовать снижению стоимости комплексов и повышению экономической эффективности использования данной технологии.

Стоит отметить, что применение БВС в кадастровой деятельности тесно связано с вопросом обеспечения безопасности, конфиденциальности и защиты данных, что несет дополнительные издержки.

В целом перспектива исследования может быть расширена за счет анализа чистой приведенной стоимости или внутренней нормы доходности для оценки срока окупаемости инвестиций в БВС; создания модели экономического анализа производительности выполнения задач; разработки индикаторов и критериев оценки точности данных и покрытия территорий с точки зрения влияния на себестоимость работ, а также моделей для определения альтернативных сценариев кадастровой деятельности (например, для съемки сельскохозяйственных угодий, городской застройки или горных территорий), в том числе с учетом типа БВС, масштаба проекта и погодных условий, а также косвенных социальных и экологических эффектов и выгод от применения БВС в кадастровой деятельности.


БИБЛИОГРАФИЯ

1. Аврунев Е.И., Каверин В.Н., Горбунова А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов в кадастре и землеустройстве на территории Республики Алтай // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: сборник материалов XIX Международного научного конгресса: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 3. С. 11–18. DOI:10.33764/2618-981X-2023-3-11-18.
2. Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. 2023. Т. 6, № 2. С. 56–60. DOI:10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
3. Супруненко Д.И., Ершов А.В., Чернов А.В. Проблемы внедрения беспилотных летательных аппаратов в кадастр недвижимости // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов V Национальной научно-практической конференции: в 3 ч. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Ч. 3. С. 130–133. DOI:10.33764/2687-041X-2022-3-130-133.
4. Овчинникова Н.Г., Медведков Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3, № 1. С. 98–108. DOI:10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.
5. Постонен Д.В. Использование беспилотных летательных аппаратов, квадрокоптеров при выполнении кадастровых работ // Кадастр недвижимости. 2020. № 3 (60). С. 77–82.



6. Борисов Е.А. Применение БПЛА в кадастровой деятельности // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 7-1 (94). С. 59–62. DOI:10.24412/2500-1000-2024-7-1-59-62.
7. Балабина И.С. Использование беспилотных летательных аппаратов для решения проблем качества кадастровых работ // Военно-экономический вестник. 2023. № 1. С. 76–79.
8. Хубаев А.О., Макаев Н.В., Шевченко Н.В. Повышение эффективности производства геодезических работ с применением беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 412–418. DOI:10.24412/2071-6168-2024-2-412-413.
9. Абрамов В.И. Использование беспилотных летательных аппаратов при проведении инженерно-геодезических изысканий // Теория и практика современной науки. 2023. № 5 (95). С. 282–285. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rus.modern-j.ru/_files/ugd/b06fdc_77eadbcef13c44e5b41495ee78289cf8.pdf (дата обращения: 17.05.2025)
10. Дроздова М.А., Удалова Д.В., Беляева К.А. и др. Правовые основы использования беспилотных летательных аппаратов в землеустройстве и кадастре, включая международный аспект // Аграрное и земельное право. 2023. № 11 (227). С. 307–310. DOI:10.47643/1815-1329_2023_11_307.

АВТОРЫ

Редина Юлия Николаевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра экономики, факультет управления территориями
канд. экон. наук
 0000-0002-5007-7773

Забеева Марина Николаевна

 m_zabaeva@gambler.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра экономики, факультет управления территориями
д-р экон. наук, доцент
 0000-0003-3713-5972

Поступила 28.05.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.

UDC 528.5

DOI:10.30533/scidata-2025-16-08



Economic Issues of Using Unmanned Aerial Vehicles in Cadastral Activities

Yulia N. Redina¹✉, Marina N. Zabaeva¹

AFFILIATIONS

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

✉ jn_redina@mail.ru

CITATION

Redina YuN, Zabaeva MN. Economic Issues of Using Unmanned Aerial Vehicles in Cadastral Activities. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 8–29. DOI:10.30533/scidata-2025-16-08.

KEYWORDS

unmanned aerial vehicle, economic issue, cadastral activity, efficiency criterion, economic effect

ABSTRACT

The development of modern technologies gives a powerful impetus to transformation and creates new opportunities to improve the efficiency of cadastral activities. However, the high cost of work using unmanned aerial vehicles (hereinafter referred to as UAVs) acutely raises the issue of economic feasibility and scaling of its implementation. The aim of the study was to analyze economic issues and identify opportunities to improve the efficiency of cadastral activities using an unmanned aerial vehicle. The types of UAVs were studied, the factors and characteristics influencing decision-making on the use of UAVs in cadastral activities were analyzed, a comparative economic assessment of complex cadastral works with geodetic survey of the territory and using UAVs was carried out using the cost method; the economic effects and criteria were analyzed, and recommendations were proposed in the context of improving efficiency. The results of the study confirm the significant potential for use of unmanned aerial vehicles in cadastral

activities, however, they emphasize a number of issues regarding weighing the benefits and costs, as well as the possibility in performing certain types of tasks.

REFERENCES

1. Avrunev EI, Kaverin VN, Gorbunova AA. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v kadastrе i zemleustroistve na territorii Respubliki Altai [Use of Unmanned Aerial Vehicles in Cadastre and Land Management in the Altai Republic]. *Interexpo GEO-Siberia: Proceedings of the XXII International Exhibition and Scientific Congress*. In 8 vols. Vol. 3. Novosibirsk: SSUGT; 2023: 11–18. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2023-3-11-18.
2. Turk GG, Karachev NK. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (BPLA) v geodezii [Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Geodesy]. *Vektor GeoNauk*. 2023;6(2): 56–60. (In Russian). DOI:10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
3. Suprunenko DI. Problemy vnedreniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v kadastr nedvizhimosti [Problems of Introducing Unmanned Aerial Vehicles into the Real Estate Cadastre]. *Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions: Proceedings of the V National Scientific and Practical Conference*. In 3 parts. Part 3. 2022: 130–133. (In Russian). DOI:10.33764/2687-041X-2022-3-130-133.
4. Ovchinnikova NG, Medvedkov DA. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya vedeniya zemleustroistva, kadastra i gradostroitel'stva [Use of Unmanned Aerial Vehicles for Land Management, Cadastral Survey and Urban Planning]. *Economy and Ecology of Territorial Entities*. 2019;3(1): 98–108. (In Russian). DOI:10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108.
5. Postonen DV. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov, kvadropteroov pri vypolnenii kadastrykh rabot [Use of Unmanned Aerial Vehicles, Quadcopters in Cadastral Works]. *Real Estate Cadastre*. 2020;3(60): 77–82. (In Russian).
6. Borisov EA. Primenenie BPLA v kadastrvoi deyatelnosti [Use of UAVs in Cadastral Activities]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;7-1(94): 59–62. (In Russian). DOI:10.24412/2500-1000-2024-7-1-59-62.
7. Balabina IS. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya resheniya problem kachestva kadastrykh rabot [Using Unmanned Aerial Vehicles to Solve Problems of Cadastral Work Quality]. *Military-Economic Bulletin*. 2023;1: 76–79. (In Russian).
8. Khubaev AO, Makaev NV, Shevchenko NV. Povyshenie effektivnosti proizvodstva geodezicheskikh rabot s primeneniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Improving the Efficiency of Geodetic Works Using Unmanned Aerial Vehicles]. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024;2: 412–418. (In Russian). DOI:10.24412/2071-6168-2024-2-412-413.
9. Abramov VI. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri provedenii inzhenerno-geodezicheskikh izyskaniy [Use of Unmanned Aerial Vehicles in Engineering and Geodetic Surveys]. *Theory and Practice of Modern Science*.


2023;5(95): 282–285. (In Russian). Available from: https://rus.modern-j.ru/_files/ugd/b06fdc_77eadbcef13c44e5b41495ee78289cf8.pdf (Accessed 17 May 2025).

10. Drozdova MA, Udalova DV, Belyaeva KA, et al. Pravovye osnovy ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v zemleustroistve i kadastre, vklyuchaya mezhdunarodnyi aspekt [Legal Basis for the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Land Management and Cadastre, Including the International Aspect]. *Agrarian and Land Law*. 2023;11(227): 307–310. (In Russian). DOI:10.47643/1815-1329_2023_11_307.

AUTHORS

Yulia N. Redina

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Economics, Faculty of Territorial Management
PhD in Economics

 0000-0002-5007-7773

Marina N. Zabaeva

 m_zabaeva@rambler.ru

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Economics, Faculty of Territorial Management
Dr. of Sci. (Economics), Associate Professor

 0000-0002-5007-7773

Submitted: May 28, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



Влияние состава выборок аэрокосмических изображений ДЗЗ высокого и сверхвысокого пространственного разрешения на обучение и точность нейронных сетей при семантической сегментации геополей на примере распознавания различных классов земной поверхности

Н.А. Бирюков¹✉

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ 4096414@gmail.com

ЦИТИРОВАНИЕ

Бирюков Н.А. Влияние состава выборок аэрокосмических изображений ДЗЗ высокого и сверхвысокого пространственного разрешения на обучение и точность нейронных сетей при семантической сегментации геополей на примере распознавания различных классов земной поверхности // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, №2. С. 30–57. DOI:10.30533/scidata-2025-16-12.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

геополе, множество геополей, семантическая сегментация, состав выборок данных, дисбаланс классов, нейронная сеть, точность распознавания

АННОТАЦИЯ

Выборки из аэрокосмических изображений и масок, используемые при решении задач распознавания различных классов земной поверхности, могут оказывать существенное влияние на обучаемость моделей нейронных сетей и получаемые в дальнейшем

с их помощью результаты распознавания. Состав выборок данных в большинстве случаев рассматривается не относительно самих выборок, а с точки зрения обработки данных нейронными сетями в целом в конкретной задаче. В контексте семантической сегментации геополей сформулированы общие для задач семантической сегментации объектов на аэрокосмических изображениях проблемы: разные яркостные характеристики снимков, тени, эквивалентность яркостных характеристик объектов целевого класса и других объектов сцен, некорректная разметка, граничные случаи дисбаланса классов. Все перечисленное рассматривается как проблемы представления исходного множества геополей в выборках данных. В результате эксперимента с нейронными сетями U Net, STT и MF-CNN определено, что включаемые в выборки граничные случаи дисбаланса классов и применение снимков с разрешением, при котором дисбаланс классов выше, чем при использовании частей снимков, существенно снижают обучаемость нейронных сетей и точность распознавания, а отбор данных на основе удаления граничных случаев дисбаланса классов при предобработке позволяет как повысить точность распознавания, так и снизить необходимые для обучения моделей временные затраты.

1 Введение

Выборки данных, используемые для обучения, валидации и тестирования, оказывают прямое влияние как на обучение моделей нейронных сетей, так и на получаемые в дальнейшем результаты распознавания различных классов объектов. Наиболее распространенными при решении задач семантической сегментации аэрокосмических изображений являются классы «Здания», «Дорожная сеть», «Водные объекты» и «Растительность». Влияние состава аэрокосмических изображений и масок для распознавания указанных классов, в который могут входить снимки с разными яркостными характеристиками [1–4], цифровые изображения с эквивалентностью яркостных характеристик объектов целевого класса другим объектам сцены [3–6] или аэрофото- и космоснимки с различием в яркостных характеристиках распознаваемых объектов [4, 5] и т. д., рассматривается главным образом на уровне включения концептуальных и прикладных решений в рамках архитектур нейронных сетей. Это, с одной стороны, приводит к развитию существующих решений, а с другой — затрудняет оценку получаемых результатов, т. к. даже с учетом развития концептуальных решений, появления новых архитектур нейронных сетей и включения разных модулей выборки данных оказывают влияние как на обучение моделей, которое определяет возможность дальнейшего использования, так и на количественные результаты метрик оценки точности распознавания при валидации и тестировании.

Известно, что при предобработке цифровых аэрокосмических изображений и масок в выборках производится деление аэрокосмических снимков

и соответствующих им эталонов на части [1, 7–9] и аугментация данных [1, 2, 10]. Однако предшествующий делению на части (или следующий за ним) отбор снимков и масок, который может приводить к изменению состава выборки данных, и само деление во многих случаях опускаются или не рассматриваются как необходимые, уступая свое место количеству данных в выборке, являющемуся важным фактором для успешного решения задач глубокого обучения. Это может приводить к ситуации, когда граничные случаи дисбаланса классов (т. е. случаи, когда объект целевого класса занимает все цифровое изображение или отсутствует на снимке) могут стать основой состава выборки данных, а упущенная некорректная разметка или снимки с разными яркостными характеристиками, соотношение которых в рамках состава выборки не сбалансировано, могут приводить к существенному снижению обучаемости и точности распознавания моделей нейронных сетей для семантической сегментации дорожной сети, зданий, водных объектов и растительности.

Целью данной работы является определение в рамках семантической сегментации геополей, объединяющей задачи семантической сегментации объектов на аэрофото- и космоснимках, влияния состава выборок данных на результаты обучения, валидации и тестирования моделей нейронных сетей на примере распознавания дорожной сети, зданий, растительности и водных объектов на аэрокосмических изображениях высокого и сверхвысокого пространственного разрешения.

2 Материалы и методы

Для формулирования общей задачи семантической сегментации геополей посредством нейронных сетей определим на базе изложенного в [11], а также на основе предпосылок в действующих государственных стандартах Российской Федерации (ст. 3.1.1, 3.1.20, 3.1.21 ГОСТ Р 59079-2020¹, ст. 23–25 ГОСТ Р 59753-2021², ст. 3.1.7 ГОСТ Р 58849-2020³ и ст. 3.1.12, 3.1.21 ГОСТ Р 59328-2021⁴) следующее:

- цифровой космический снимок — графическое представление для некоторого участка земной поверхности множества геополей собственного и отраженного элементами суши, океана и атмосферы Земли электромагнитного

1 ГОСТ Р 59079-2020. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Типы данных дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.

2 ГОСТ Р 59753-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 20 с.

3 ГОСТ Р 58849-2020. Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2020. 62 с.

4 ГОСТ Р 59328-2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2021. 36 с.

излучения в определенных спектральных диапазонах длин волн, полученное с космического аппарата в единой геометрии съемки на одну дату и время;

- цифровой аэрофотоснимок — графическое представление для некоторого участка объекта аэрофотосъемки множества геополей собственного и отраженного элементами суши, океана и атмосферы Земли электромагнитного излучения в определенных спектральных диапазонах длин волн, полученное с воздушного судна в единой геометрии съемки на одну дату и время;
- результат распознавания модели нейронной сети — цифровое изображение, являющееся графическим представлением для некоторого участка земной поверхности геополя пространственного распределения собственного и отраженного одним или несколькими классами объектов, которые могут являться элементами суши, океана и атмосферы Земли, электромагнитного излучения в определенных спектральных диапазонах длин волн.

Таким образом, семантическая сегментация геополей посредством нейронных сетей представляет собой переход от исходного множества геополей, представленного цифровым аэрокосмическим изображением, к результату распознавания, который является графическим представлением результирующего множества геополей, что запишем в общем виде как

1

$$G_{RGFS} = Q(G_{OGFS}),$$

где G_{RGFS} — результирующее множество геополей;

G_{OGFS} — исходное множество геополей;

Q — оператор связи, представленный сложной нелинейной функцией, реализуемой нейронной сетью.

2.1 Выборки данных, используемые для различных задач семантической сегментации классов земной поверхности

В зависимости от решаемой задачи характеристики цифровых изображений и масок могут различаться. Основные характеристики выборок данных, используемых для различных задач семантической сегментации аэрокосмических изображений, в числе которых пространственное разрешение (ПР) и радиометрическое разрешение (РР), представлены в **табл. 1**.

Таблица 1 Основные характеристики выборок данных в задачах распознавания различных классов земной поверхности посредством нейронных сетей

Table 1 Main datasets characteristics in different earth's surfaces classes recognition with neural networks tasks

Задача	ПР, м	PP, бит/пиксель	Разрешение	Композиция	Тип снимка
1 Выделение зданий	0,2–1 1–10	8–24	256×256 512×512	RGB	аэрофото-, космический
2 Выделение водных объектов	0,2–1 1–10 10–100 100–1000		256×256 512×512 640×640	RGB NIR-RGB	космический
3 Распознавание растительности	0,2–1 1–10 10–100 100–1000		224×224 256×256 512×512	NIR-RGB RGB	аэрофото-, космический
4 Распознавание дорожной сети	0,2–1 10–100		256×256 512×512 1024×1024 1500×1500	RGB	

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее распространенные значения характеристик в контексте каждой задачи.

Исходя из представленных значений основных характеристик выборок данных, можно сделать следующий вывод: в настоящее время наиболее часто при решении с помощью нейронных сетей задач, указанных в **табл. 1**, используются цифровые изображения сверхвысокого пространственного разрешения и соответствующие им маски.

2.2 Проблемы состава выборок данных в задачах распознавания различных классов земной поверхности на аэрофото- и космоснимках

В задачах семантической сегментации аэрокосмических изображений на основе объектов целевого класса можно выделить проблемы, влияющие на точность распознавания моделей нейронных сетей и определяющие развитие концептуальных и прикладных решений в каждой семантической сегментации объектов на аэрокосмических изображениях [2, 3, 5, 7]. Эти проблемы относятся и к составу

выборки данных, т. к. на основе обеспечения и проверки робастности нейронных сетей к поступающим в них данным в состав выборок включают снимки, отражающие разные случаи в рамках генеральной совокупности конкретной задачи распознавания классов земной поверхности. Кроме того, проблемы, связанные с метрической составляющей распознаваемого объекта или с его яркостными характеристиками (запечатленным собственным и отраженным электромагнитным излучением), могут быть присущи всем снимкам и поэтому будут присутствовать в любой выборке.

В задаче выделения объектов класса «Здания» на аэрокосмических изображениях в качестве проблем в составе выборок данных выделены:

- 1) разные яркостные характеристики зданий [5, 12, 13];
- 2) эквивалентность яркостных характеристик зданий и других объектов сцен [5, 12];
- 3) наличие на снимках теней, скрывающих здания [13, 14];
- 4) высокая плотность застройки городских территорий [11];
- 5) разные яркостные характеристики снимков [1, 15], взятых для разных областей интереса или полученных с помощью съемочной аппаратуры, имеющей разное спектральное и радиометрическое разрешение [16].

В задаче выделения объектов класса «Водные объекты» на космических и аэрофотоснимках проблемами, относящимися к составу выборок данных, являются:

- 1) разные яркостные характеристики водных объектов [17];
- 2) эквивалентность яркостных характеристик объектов сцен и водных объектов [3, 17];
- 3) наличие на снимках лесной растительности и теней [17, 18];
- 4) разные погодные условия и времена года [19];
- 5) наличие водных объектов, занимающих малую площадь на сцене и имеющих нечеткие границы [20–22];
- 6) разные яркостные характеристики снимков [18, 22], снятых с помощью аппаратуры, имеющей разное спектральное и радиометрическое разрешение, или полученных для разных областей интереса [3, 23, 24].

К основным проблемам состава выборок данных в задаче распознавания объектов класса «Растительность» отнесены:

- 1) разные яркостные характеристики растительности [25, 26], в том числе из-за того, что на снимках могут быть запечатлены разные этапы цветения [2];
- 2) эквивалентность яркостных характеристик растительности и других объектов сцен [10, 25, 26];
- 3) городские территории, на которых наличие растительности носит фрагментарный характер [27, 28];
- 4) разные яркостные характеристики цифровых изображений [27, 29, 30], снятых в разное время года.

В задаче выделения объектов класса «Дорожная сеть» для состава выборок данных характерны такие проблемы, как:

- 1) разные яркостные характеристики дорог [31, 32];
- 2) эквивалентность яркостных характеристик дорожной сети и других объектов [7, 33, 34];
- 3) наличие на снимках теней, скрывающих участки дорожной сети [4, 35, 36];
- 4) дисбаланс классов [37–39].

Следует отметить, что некоторые проблемы в составе выборок данных, могущие влиять на результат обучения, валидации, тестирования и дальнейшего использования моделей нейронных сетей для семантической сегментации классов земной поверхности, в научных публикациях в большинстве случаев не рассматриваются. **Среди таких проблем можно выделить:**

- 1) некорректную разметку снимков в выборках данных, которая может напрямую влиять на обучаемость моделей и на получаемые при валидации и тестировании результаты количественной оценки точности распознавания по метрикам оценки точности;
- 2) граничные случаи дисбаланса классов (когда объекты целевого класса занимают весь снимок или отсутствуют на нем) после деления цифровых снимков и масок на части при предобработке данных или имеющиеся на исходных цифровых изображениях.

2.3 Проблемы состава выборок данных для семантической сегментации геополей

В контексте семантической сегментации геополей посредством нейронных сетей указанные проблемы в составах выборок для задач распознавания различных классов земной поверхности относятся к проблемам представления исходного множества геополей G_{OGFS} в выборках данных.

Таким образом, проблемы состава выборок аэрокосмических изображений и масок для семантической сегментации геополей включают в себя:

- 1) присутствие на снимках теней;
- 2) разные яркостные характеристики объектов целевого класса;
- 3) эквивалентность яркостных характеристик объектов целевого класса и других объектов;
- 4) дисбаланс классов;
- 5) разные яркостные характеристики снимков;
- 6) некорректная разметка снимков;
- 7) случаи, в которых объекты целевого класса занимают весь снимок (или его часть, полученную в рамках предобработки данных) либо отсутствуют на нем.

3 Результаты

В вычислительном эксперименте по определению влияния состава выборок данных на результаты обучения, валидации и тестирования моделей нейронных сетей семантической сегментации геополей **использованы следующие нейронные сети:**

1. U-Net с основой ResNet-50 [11] — базовая нейронная сеть для семантической сегментации цифровых изображений в настоящее время, архитектура которой используется в качестве основы при решении задач распознавания различных классов земной поверхности;
2. STT (англ. Sparse Token Transformer) [11] — архитектура на основе трансформера, являющаяся одним из вариантов реализации механизмов внимания;
3. MF-CNN (англ. Multiscale Features-Convolutional Neural Network) [11] — сверточная нейронная сеть, являющаяся одной из реализаций обработки глобальных признаков (в данном случае через мультимасштабный модуль в архитектуре сети).

Рассмотрение результатов для нескольких нейронных сетей обусловлено тем, что механизмы внимания и обработка глобальных признаков являются основными используемыми в настоящее время концептуальными решениями, на которые состав выборок данных может оказывать разное влияние с точки зрения как обучаемости, так и точности распознавания.

В рамках вычислительного эксперимента рассматривается четыре класса объектов, а именно: «Здания», «Дорожная сеть», «Водные объекты» и «Лес». Следует отметить, что при проводимой семантической сегментации берется случай, когда должны быть распознаны и отнесены к соответствующему классу в рамках всякой решаемой задачи семантической сегментации классов земной поверхности каждое здание (вне зависимости от его типа), каждый водный объект (река, болото, море, озеро) и т. д. Это связано с намерением рассмотреть один из сложных случаев. Выбор определенного типа зданий, конкретного водного объекта или дорожной сети с заранее указанным покрытием существенно упрощает задачу (из-за наличия типичных яркостных характеристик, меньшей схожести с другими объектами и т. д.) и снимает часть рассматриваемых проблем. Подобное упрощение, однако, может приводить к отсутствию робастности при обработке данных нейронной сетью, например в случае работы со снимками разных территорий или изображениями, полученными с помощью разной съемочной аппаратуры, снимками с нечеткими границами или разными яркостными характеристиками объектов целевого класса.

Для выполнения эксперимента использованы три общедоступные выборки данных:

- WHU Buildings Dataset [1, 5, 6] (также известная как WHU-BE) — для определения влияния состава выборок данных на результаты обучения, валидации и тестирования нейронных сетей в задаче выделения объектов класса «Здания»;
- DeepGlobe Land Cover Classification Dataset [40] — для определения влияния состава выборок данных на обучаемость и точность распознавания моделей в задаче выделения объектов класса «Водные объекты» и распознавания объектов класса «Лес»;
- DeepGlobe Road Extraction Dataset [7, 33] — для определения влияния состава выборок данных на результаты, получаемые в задаче выделения объектов класса «Дорожная сеть».

В состав данных выборок входят снимки:

- с разными яркостными характеристиками объектов целевых классов;
- эквивалентностью яркостных характеристик объектов интереса и других объектов сцен;
- тенями;
- разными яркостными характеристиками (данные случаи в выборке WHU-BE отсутствуют, но присутствуют в выборках DeepGlobe);
- дисбалансом классов.

Таким образом, используемые общедоступные выборки данных позволяют рассмотреть большую часть проблематики в составе выборок данных для задач распознавания различных классов объектов на аэрокосмических изображениях. Характеристики указанных выборок представлены в **табл. 2**.

Таблица 2 Метаданные исходных выборок данных для выполнения вычислительного эксперимента

Table 2 Metadata of original datasets for semantic segmentation experiment

Выборка данных	Год	ПР, м	РР, бит/пикс.	Разрешение снимка	Тип снимка	Кол-во снимков в подвыборке		
						обуч.	валид.	тест.
WHU Building Dataset	2022	1	8	512×512	аэрофото	4736	1036	2416
DeepGlobe Road Extraction Dataset	2018	0,5	24	1024×1024	космический	6226	1243*	1101*
DeepGlobe Land Cover Classification Dataset				2448×2448		803	172*	171*

Примечание. Знаком * обозначено отсутствие разметки для данных.

На основе используемых общедоступных выборок данных составлены при пре-добработке, включающей деление на части, выборки с сохранением граничных случаев дисбаланса классов и выборки, в которых данные случаи сведены к минимуму (5–10 % от данных в выборке). В рамках выделения дорожной сети рассматривается влияние дисбаланса классов при разном разрешении данных в выборках на получаемые результаты обучения и распознавания, т.к. в случае дорожной сети дисбаланс классов в научных работах отмечается отдельно [37–39]. Кроме того, аугментация данных для уравнивания их количества в случае сохранения и удаления граничных случаев дисбаланса классов при предобработке не проводилась, поскольку она может исказить (повысить относительно сохранения граничных случаев) результаты обучения, валидации и тестирования на выборках при удалении граничных случаев дисбаланса классов. Поэтому было решено искусственно не повышать количество данных (несмотря на его снижение) после соответствующего отбора. Характеристики составленных выборок представлены в **табл. 3**.

Таблица 3 Составленные для вычислительного эксперимента выборки данных с сохранением и после удаления большей части граничных случаев дисбаланса классов (сохранение 5–10 % случаев в подвыборках)

Table 3 Datasets compiled for semantic segmentation experiment with borderline cases of class imbalance preservation and with part of class imbalance borderline cases deletion (preservation of 5–10% borderline cases in subsets)

Класс объектов	Исходная выборка	Используемое разрешение	Количество каналов	Количество снимков в подвыборке		
				обучающей	валидационной	тестовой
С сохранением граничных случаев дисбаланса классов						
Здания	WHU Building Dataset	512×512	3	4736	1036	2416
Водные объекты	DeepGlobe Land Cover Classification Dataset			4300	1375	750
Лес				3175	400	400
Дорожная сеть	DeepGlobe Road Extraction Dataset	1024×1024		4800	964	462
После удаления большей части граничных случаев дисбаланса классов						
Водные объекты	DeepGlobe Land Cover Classification Dataset	512×512	3	1980	463	175
Лес				1918	106	158
Дорожная сеть				DeepGlobe Road Extraction Dataset	2938	640

Обучение, валидация и тестирование моделей нейронных сетей проведены с использованием видеокарты NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti. Параметры моделей нейронных сетей, используемые при работе с выборками аэрокосмических изображений и масок с сохранением граничных случаев и выборками, полученными в результате удаления последних, представлены в **табл. 4**.

Таблица 4 Параметры моделей для обучения, валидации и тестирования на выборках с сохранением и после удаления граничных случаев дисбаланса классов

Table 4 Model parameters for training, validation and testing on datasets with borderline cases of class imbalance preservation and when class imbalance borderline cases are deleted

Класс объектов	Количество эпох обучения	Скорость обучения	Количество поступающих образцов
С сохранением граничных случаев дисбаланса классов			
Здания	20	0,001	4
Водные объекты	5		4
Лес	20		4
Дорожная сеть	5	0,01	2
После удаления граничных случаев дисбаланса классов			
Водные объекты	20	0,001	4
Лес	20		4
Дорожная сеть	25		4

Результаты обучения моделей в задачах распознавания объектов классов «Дорожная сеть», «Здания», «Водные объекты» и «Лес» на указанных выборках данных представлены в **табл. 5–10**.

Таблица 5 Результат обучения моделей для выделения дорожной сети на подвыборке с разрешением снимков 1024×1024 (среднее значение бинарной кросс-энтропии)

Table 5 Model training result for roads extraction on subset with images resolution 1024×1024 (mean binary cross-entropy value)

Модель	Эпоха			Затраченное время (с учетом проведения валидации), чч:мм:сс
	1-я	3-я	5-я	
U-Net (ResNet50)	0,0581	0,0358	0,0324	03:25:42
STT	0,0769	0,0464	0,0372	03:52:45
MF-CNN	0,0593	0,0412	0,0374	01:50:12

Таблица 6 Результат обучения моделей для выделения дорожной сети на подвыборке с разрешением частей 512×512 после удаления граничных случаев дисбаланса классов (среднее значение бинарной кросс-энтропии)

Table 6 Model training result for roads extraction on subset with crops resolution 512×512 after class imbalance borderline cases deletion (mean binary cross-entropy value)

Модель	Эпоха				Затраченное время (с учетом проведения валидации), чч:мм:сс
	1-я	5-я	15-я	25-я	
U-Net (ResNet50)	0,0955	0,0568	0,0406	0,0312	02:52:42
STT	0,0658	0,0457	0,0387	0,0348	02:59:07
MF-CNN	0,0854	0,0575	0,0467	0,0412	01:18:08

Таблица 7 Результат обучения моделей для распознавания объектов класса «Лес» с сохранением и после удаления граничных случаев дисбаланса классов (среднее значение бинарной кросс-энтропии)

Table 7 Model training result for “Forest” class recognition with borderline cases of class imbalance preservation and when class imbalance borderline cases are deleted (mean binary cross-entropy value)

Модель	Эпоха			Затраченное время (с учетом проведения валидации), чч:мм:сс
	1-я	10-я	20-я	
С сохранением граничных случаев дисбаланса классов				
U-Net (ResNet50)	0,1271	0,0772	0,0667	02:23:24
STT	0,1359	0,0800	0,0760	02:26:10
MF-CNN	0,1152	0,0746	0,0683	01:20:10
После удаления граничных случаев дисбаланса классов				
U-Net (ResNet50)	0,1248	0,0852	0,0767	01:28:38
STT	0,1215	0,0996	0,0784	01:20:07
MF-CNN	0,1153	0,0869	0,0820	00:51:24

Таблица 8 Результат обучения моделей для выделения объектов класса «Водные объекты» при сохранении граничных случаев дисбаланса классов (среднее значение бинарной кросс-энтропии)

Table 8 Model training result for “Water bodies” class extraction with borderline cases of class imbalance preservation (mean binary cross-entropy value)

Модель	Эпоха			Затраченное время (с учетом проведения валидации), чч:мм:сс
	1-я	3-я	5-я	
U-Net (ResNet50)	0,0554	0,0335	0,0234	00:52:26
STT	0,0674	0,0425	0,0718	00:58:18
MF-CNN	0,0506	0,0315	0,0255	00:42:26

Таблица 9 Результат обучения моделей для выделения водных объектов после удаления граничных случаев дисбаланса классов (среднее значение бинарной кросс-энтропии)

Table 9 Model training result for water bodies extraction with class imbalance borderline cases deletion (mean binary cross-entropy value)

Модель	Эпоха				Затраченное время (с учетом проведения валидации), чч:мм:сс
	1-я	5-я	10-я	20-я	
U-Net (ResNet50)	0,0913	0,0487	0,0362	0,0264	01:37:37
STT	0,1254	0,0882	0,0524	0,0316	01:40:09
MF-CNN	0,0837	0,0496	0,0386	0,0268	00:56:04

Таблица 10 Результат обучения моделей для выделения зданий (среднее значение бинарной кросс-энтропии)

Table 10 Model training result for building extraction (mean binary cross-entropy value)

Модель	Эпоха					Затраченное время (с учетом проведения валидации), чч:мм:сс
	1-я	5-я	10-я	15-я	20-я	
U-Net (ResNet50)	0,0593	0,0228	0,0181	0,0153	0,0134	03:35:08
STT	0,1685	0,0758	0,0656	0,0647	0,0595	03:46:46
MF-CNN	0,0478	0,0251	0,0208	0,0185	0,0171	01:59:23

Результаты валидации для соответствующих эпох обучения представлены в табл. 11–16.

Таблица 11 Результаты валидации для выделения класса «Дорожная сеть» на подвыборке с разрешением снимков 1024×1024 (метрика IoU)

Table 11 Validation results for “Roads” class extraction on subset with images resolution 1024×1024 (IoU metric)

Модель	Эпоха		
	1-я	3-я	5-я
U-Net (ResNet50)	0,4260	0,3850	0,5145
STT	0,5139	0,5521	0,5642
MF-CNN	0,2939	0,5526	0,4470

Таблица 12 Результаты валидации для выделения класса «Дорожная сеть» на подвыборке с разрешением частей 512×512 после удаления граничных случаев дисбаланса классов (метрика IoU)

Table 12 Validation results for “Roads” class extraction on subset with crops resolution 512×512 after class imbalance borderline cases deletion (IoU metric)

Модель	Эпоха			
	1-я	5-я	15-я	25-я
U-Net (ResNet50)	0,0181	0,4349	0,5359	0,5622
STT	0,4983	0,5521	0,5973	0,6416
MF-CNN	0,2490	0,3963	0,4883	0,5311

Таблица 13 Результаты валидации для распознавания класса «Лес» при сохранении и после удаления граничных случаев дисбаланса классов (метрика IoU)

Table 13 Validation results for “Forest” class recognition with borderline cases of class imbalance preservation and when class imbalance borderline cases are deleted (IoU metric)

Модель	Эпоха		
	1-я	10-я	20-я
С сохранением граничных случаев дисбаланса классов			
U-Net (ResNet50)	0,4097	0,4435	0,5112
STT	0,4282	0,5159	0,5688
MF-CNN	0,4199	0,5323	0,4603
После удаления граничных случаев дисбаланса классов			
U-Net (ResNet50)	0,4667	0,5767	0,6370
STT	0,6211	0,6377	0,6734
MF-CNN	0,5792	0,6366	0,6069

Таблица 14 Результаты валидации для выделения класса «Водные объекты» при сохранении граничных случаев дисбаланса классов (метрика IoU)

Table 14 Validation results for “Water bodies” class extraction with borderline cases of class imbalance preservation (IoU metric)

Модель	Эпоха		
	1-я	3-я	5-я
U-Net (ResNet50)	0,4671	0,5881	0,6185
STT	0	0	0
MF-CNN	0,4629	0,6206	0,6694

Таблица 15 Результаты валидации для выделения класса «Водные объекты» после удаления граничных случаев дисбаланса классов (метрика IoU)

Table 15 Validation results for “Water bodies” class extraction after class imbalance borderline cases deletion (IoU metric)

Модель	Эпоха			
	1-я	5-я	10-я	20-я
U-Net (ResNet50)	0,6027	0,7412	0,7722	0,7976
STT	0,0627	0,3534	0,6331	0,7825
MF-CNN	0,6286	0,6897	0,7704	0,7977

Таблица 16 Результаты валидации для выделения класса «Здания» (метрика IoU)

Table 16 Validation results for “Buildings” class extraction (IoU metric)

Модель	Эпоха				
	1-я	5-я	10-я	15-я	20-я
U-Net (ResNet50)	0,6521	0,7895	0,8366	0,8470	0,8602
STT	0,8484	0,8763	0,8852	0,9006	0,9045
MF-CNN	0,5651	0,8104	0,7973	0,7851	0,8537

Количественные результаты тестирования на выборках с сохранением граничных случаев дисбаланса классов и при их удалении представлены в **табл. 17–20**, где $F1$ — F -мера, OA (англ. Overall Accuracy) — попиксельная точность.

Таблица 17 Результаты тестирования для класса «Дорожная сеть» на подвыборке с разрешением снимков 1024×1024 и подвыборке с разрешением снимков 512×512 после удаления граничных случаев дисбаланса классов

Table 17 Testing results for class “Roads” on subset with images resolution 1024×1024 and subset with images resolution 512×512 after class imbalance borderline cases deletion

Модель	Количество эпох обучения	VCE (об.)	IoU (вал.)	IoU	F1	OA
На подвыборке с разрешением 1024×1024						
U-Net (ResNet50)	5	0,0324	0,5145	0,5330	0,6954	0,9770
STT	5	0,0372	0,5642	0,5847	0,7380	0,9812
MF-CNN	5	0,0375	0,4470	0,6200	0,8740	0,9734
На подвыборке с разрешением 512×512 после удаления граничных случаев дисбаланса классов						
U-Net (ResNet50)	22	0,0319	0,5702	0,5743	0,7296	0,9517
STT	25	0,0348	0,6416	0,6496	0,7876	0,9622
MF-CNN	24	0,0414	0,5301	0,5389	0,7004	0,9494

Таблица 18 Результаты тестирования для класса «Лес» при сохранении и после удаления граничных случаев дисбаланса классов

Table 18 Testing results for “Forest” class with borderline cases of class imbalance preservation and when class imbalance borderline cases are deleted

Модель	Количество эпох обучения	ВСЕ (об.)	IoU (вал.)	IoU	F1	OA
С сохранением граничных случаев дисбаланса классов						
U-Net (ResNet50)	16	0,0701	0,5944	0,7194	0,8368	0,8752
STT	17	0,0738	0,5911	0,6770	0,8074	0,8578
MF-CNN	13	0,0711	0,5689	0,6961	0,8208	0,8695
После удаления граничных случаев дисбаланса классов						
U-Net (ResNet50)	18	0,0791	0,6652	0,7851	0,8796	0,8816
STT	18	0,0808	0,6859	0,7973	0,8872	0,8853
MF-CNN	19	0,0806	0,6724	0,7973	0,8872	0,8840

Таблица 19 Результаты тестирования для класса «Водные объекты» при сохранении и после удаления граничных случаев дисбаланса классов

Table 19 Testing results for “Water bodies” class with borderline cases of class imbalance preservation and when class imbalance borderline cases are deleted

Модель	Количество эпох обучения	ВСЕ (об.)	IoU (вал.)	IoU	F1	OA
С сохранением граничных случаев дисбаланса классов						
U-Net (ResNet50)	5	0,0233	0,6185	0,6913	0,8175	0,9745
STT	3	0,0425	0	0	0	0,9373
MF-CNN	5	0,0255	0,6694	0,7762	0,8740	0,9855
После удаления граничных случаев дисбаланса классов						
U-Net (ResNet50)	15	0,0299	0,8054	0,8932	0,9436	0,9707
STT	19	0,0459	0,7906	0,8961	0,9452	0,9712
MF-CNN	18	0,0272	0,8063	0,8832	0,9380	0,9669

Таблица 20 Результаты тестирования для класса «Здания»

Table 20 Testing results for “Buildings” class

Модель	Количество эпох обучения	ВСЕ (об.)	IoU (вал.)	IoU	F1	OA
U-Net (ResNet50)	20	0,0134	0,8602	0,8642	0,9271	0,9840
STT	20	0,0595	0,9045	0,8808	0,9366	0,9860
MF-CNN	20	0,0171	0,8537	0,8496	0,9187	0,9821

4 Обсуждение

По полученным результатам обучения можно заключить следующее:

1. Удаление граничных случаев дисбаланса классов оказывает положительное влияние на обучаемость (уменьшение значений бинарной кросс-энтропии) моделей нейронных сетей на выборках аэрокосмических изображений и масок в рамках каждой из рассматриваемых задач и позволяет с большей достоверностью (применительно к сопоставлению с результатами валидации) отразить ход обучения.
2. Снимки с разными яркостными характеристиками в составе выборки для задачи выделения дорожной сети, распознавания объектов класса «Лес» и выделения водных объектов не оказали негативного влияния на возможность обучения моделей нейронных сетей для решения указанных задач.
3. Удаление граничных случаев дисбаланса классов (а значит, уменьшение размеров выборки) при решении каждой из рассматриваемых задач привело к снижению временных затрат на обучение и валидацию использованных моделей нейронных сетей с повышением эффективности проводимого обучения. Это выразилось в уменьшении значений бинарной кросс-энтропии в сравнении с обучением моделей на выборках с сохранением всех граничных случаев дисбаланса классов.
4. Снимки, на которых имеются разные или эквивалентные другим объектам яркостные характеристики объектов целевого класса, в контексте решения задач выделения всех рассматриваемых классов объектов не привели к снижению обучаемости моделей на использованных выборках.

По результатам валидации в рамках проведенного вычислительного эксперимента сделаны следующие выводы:

1. При удалении большей части граничных случаев дисбаланса классов в подвыборке для обучения точность распознавания объектов целевого класса используемыми нейронными сетями стала выше, что указывает на положительный эффект от этого удаления как части предобработки данных.
2. Как удаление, так и сохранение снимков, на которых объекты целевого класса отсутствуют или занимают всю сцену, не влияет на оценку точности распознавания объектов целевых классов моделями нейронных сетей по метрике IoU.
3. Включенные в валидационную подвыборку снимки, отражающие разные возможные случаи в контексте генеральных совокупностей для рассматриваемых задач, позволяют учитывать при валидации робастность моделей к данным, отражающим эти случаи, что, в свою очередь, положительно сказывается на дальнейшем отборе моделей для тестирования.

4. Сохранение граничных случаев дисбаланса классов может приводить к низкой (вплоть до полного отсутствия) обучаемости моделей нейронных сетей (**табл. 14**).

Исходя из результатов тестирования, можно заключить следующее:

1. Попиксельная точность (OA) как метрика оценки точности распознавания во многих случаях может некорректно отражать точность семантической сегментации целевого класса (**табл. 19**) моделями нейронных сетей на аэрокосмических изображениях.
2. Использование снимков с разрешением, при котором дисбаланс классов выше, чем при использовании частей снимков, приводит к снижению точности распознавания и ухудшает результаты семантической сегментации объектов целевого класса.
3. Обучение, валидация и тестирование моделей с использованием снимков с разными яркостными характеристиками, эквивалентностью яркостных характеристик объектов целевых классов и снимков с разными яркостными характеристиками зданий, дорожной сети, растительности и водных объектов не оказывают негативного влияния на обучаемость и точность распознавания моделей, а позволяют обеспечить более полное представление генеральной совокупности в контексте задач семантической сегментации объектов на аэрокосмических изображениях с помощью нейронных сетей.
4. Во всех решаемых в вычислительном эксперименте задачах удаление граничных случаев дисбаланса классов, где оно проводилось, привело к повышению точности распознавания при тестировании использованных моделей нейронных сетей.

Результаты вычислительного эксперимента по семантической сегментации геополей посредством нейронных сетей свидетельствуют о следующем:

1. Отбор данных на основе удаления граничных случаев дисбаланса классов в рамках предобработки выборок аэрокосмических изображений и масок и на начальном этапе, и после деления снимков на части оказывает положительное влияние на этапы работы с моделями нейронных сетей при семантической сегментации геополей на разных этапах глубокого обучения (обучение, валидация и тестирование).
2. Использование аэрокосмических снимков, отражающих проблемы представления исходного множества геополей, в составе выборок данных при обучении, валидации и тестировании позволяет учесть подобные случаи, лучше отразить генеральную совокупность и, таким образом,

повысить робастность моделей нейронных сетей для семантической сегментации геополей к поступающим в них данным.

3. Применение снимков с разрешением, при котором дисбаланс классов выше, чем при использовании частей снимков, оказывает негативное влияние на обучаемость и точность распознавания моделей семантической сегментации геополей.

5 Выводы

Сформулирована общая задача семантической сегментации геополей. Определены проблемы состава выборок данных и его влияние на обучение и точность нейронных сетей в контексте выделения водных объектов, зданий, дорожной сети, растительности на аэрокосмических изображениях высокого и сверхвысокого пространственного разрешения.

Проблемы состава выборок данных для семантической сегментации геополей связаны главным образом с представлением исходного множества геополей. К таким проблемам относятся: наличие на снимках теней, скрывающих объекты целевого класса; разные или эквивалентные другим объектам сцен яркостные характеристики; дисбаланс классов; разные яркостные характеристики снимков; некорректная разметка снимков; случаи, при которых объекты целевого класса занимают весь снимок (либо его часть, полученную в рамках предобработки данных) или полностью отсутствуют на нем.

Экспериментальные результаты указывают на то, что при составлении выборок данных снимки с разными яркостными характеристиками и снимки, на которых объекты целевого класса имеют разные или эквивалентные другим объектам, запечатленным на цифровых изображениях, яркостные характеристики, оказывают положительное влияние на учет указанных причин возникновения ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний, что впоследствии приводит к снижению числа ложных срабатываний.

На основе анализа результатов вычислительного эксперимента выявлено, что включение граничных случаев дисбаланса классов в подвыборку для обучения снижает качество обучения моделей нейронных сетей и точность семантической сегментации геополей. Кроме того, использование снимков с разрешением, при котором дисбаланс классов выше, чем при использовании частей снимков, приводит к снижению обучаемости и точности моделей нейронных сетей.

Обеспечение отбора данных при делении цифровых изображений и масок на части при предобработке данных позволяет снизить временные затраты на обучение моделей и повысить точность распознавания.

Таким образом, количество данных в выборках является приоритетным для решения задач глубокого обучения применительно к автоматизированному дешифрированию аэрокосмических изображений, однако качество данных (выраженное в наличии или отсутствии граничных случаев, в корректности разметки и включении снимков, отражающих разные случаи в рамках взятой для конкретной задачи генеральной совокупности) оказывает существенное влияние на возможность обучения и последующего использования моделей нейронных сетей.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Xu R., Mao R., Zhuang Z., et al. Building Extraction from Remote Sensing Images Based on Multi-Scale Attention Gate and Enhanced Positional Information // PeerJ Computer Science. 2025. Vol. 11. P. e2826. DOI:10.7717/peerj-cs.2826.
2. Chen Y., Xie Y., Yao W., et al. U-MGA: a Multi-Module Unet Optimized with Multi-Scale Global Attention Mechanisms for Fine-Grained Segmentation of Cultivated Areas // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. Iss. 5. P. 760. DOI:10.3390/rs17050760.
3. Cai J., Tao L., Li Y. CM-UNet++: A Multi-Level Information Optimized Network for Urban Water Body Extraction from High-Resolution Remote Sensing Imagery // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. Iss. 6. P. 980. DOI:10.3390/rs17060980.
4. Gui L., Gu X., Huang F., et al. Road Extraction from Remote Sensing Images Using a Skip-Connected Parallel CNN-Transformer Encoder-Decoder Model // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Iss. 3. P. 1427. DOI:10.3390/app15031427.
5. Liu Y., Duan Y., Zhang X., et al. FEPA-Net: A Building Extraction Network Based on Fusing the Feature Extraction and Position Attention Module // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Iss. 8. P. 4432. DOI:10.3390/app15084432.
6. Zhu B., Yu D., Xiao X., et al. AP-Pointrend: An Improved Network for Building Extraction via High-Resolution Remote Sensing Images // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. Iss. 9. P. 1481. DOI:10.3390/rs17091481.
7. Li X., Yang S., Meng F., et al. LCMorph: Exploiting Frequency Cues and Morphological Perception for Low-Contrast Road Extraction in Remote Sensing Images // Remote Sensing. 2025. Vol. 17. Iss. 2. P. 257. DOI:10.3390/rs17020257.
8. Weng Z., Li Q., Zheng Z., et al. SCR-Net: A Dual-Channel Water Body Extraction Model Based on Multi-Spectral Remote Sensing Imagery – A Case Study of Daihai Lake, China // Sensors. 2025. Vol. 25. Iss. 3. P. 763. DOI: 10.3390/s25030763.
9. Wu Q., Chen M., Shi H., et al. Algorithm for Detecting Trees Affected by Pine Wilt Disease in Complex Scenes Based on CNN-Transformer // Forests. 2025. Vol. 16. Iss. 4. P. 596. DOI:10.3390/f16040596.
10. Wang L., Gao Y., Liu Y., et al. Monitoring Pine Shoot Beetle Damage Using UAV Imagery and Deep Learning Semantic Segmentation Under Different Forest Backgrounds // Forests. 2025. Vol. 16. Iss. 4. P. 668. DOI:10.3390/f16040668.

11. Бирюков Н.А., Майоров А.А., Лапчинская М.П. Семантическая сегментация геополей с использованием нейронных сетей на примере проблематики выделения зданий на космо- и аэрофотоснимках // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68, № 1. С. 44–61. DOI:10.30533/GiA-2024-004.
12. Li J., He W., Cao W., et al. UANet: An Uncertainty-Aware Network for Building Extraction from Remote Sensing Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2024. Vol. 62. P. 5608513. DOI:10.1109/TGRS.2024.3361211.
13. Han R., Fan X., Liu J. EUNet: Edge-Unet for Accurate Building Extraction and Edge Emphasis in Gaofen-7 Images // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Iss. 13. P. 2397. DOI:10.3390/rs16132397.
14. Fenglei W., Xin G., Zongze Z., et al. A Boundary-Enhanced Semantic Segmentation Model for Buildings // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2025. Vol. 18. P. 5733–5748. DOI:10.1109/JSTARS.2025.3529456.
15. Chen P., Huang H., Ye F., et al. A Benchmark Gaofen-7 Dataset for Building Extraction from Satellite Images // Scientific Data. 2024. Vol. 11. P. 187. DOI:10.1038/s41597-024-03009-5.
16. Li S., Bao T., Liu H., et al. Multilevel Feature Aggregated Network with Instance Contrastive Learning Constraint for Building Extraction // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 10. P. 2585. DOI:10.3390/rs15102585.
17. Lyu X., Jiang W., Li X., et al. MSAFNet: Multiscale Successive Attention Fusion Network for Water Body Extraction of Remote Sensing Images // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 12. P. 3121. DOI:10.3390/rs15123121.
18. Li M., Hong L., Guo J., et al. Automated Extraction of Lake Water Bodies in Complex Geographical Environments by Fusing Sentinel-1/2 Data // Water. 2022. Vol. 14. Iss. 1. P. 30. DOI:10.3390/w14010030.
19. Wang Y., Li S., Lin Y., et al. Lightweight Deep Neural Network Method for Water Body Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images with Multisensors // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 21. 7397. DOI:10.3390/s21217397.
20. Wang B., Chen Z., Wu L., et al. SADA-Net: A Shape Feature Optimization and Multiscale Context Information-Based Water Body Extraction Method for High-Resolution Remote Sensing Images // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. Vol. 15. P. 1744–1759. DOI:10.1109/JSTARS.2022.3146275.
21. Weng Y., Li Z., Tang G., et al. OCNet-Based Water Body Extraction from Remote Sensing Images // Water. 2023. Vol. 15. Iss. 20. P. 3557. DOI:10.3390/w15203557.
22. Yu J., Cai Y., Lyu X., et al. Boundary-Guided Semantic Context Network for Water Body Extraction from Remote Sensing Images // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 17. P. 4325. DOI:10.3390/rs15174325.
23. Li M., Wu P., Wang B., et al. A Deep Learning Method of Water Body Extraction from High Resolution Remote Sensing Images with Multisensors // IEEE Journal

- of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2021. Vol. 14. P. 3120–3132. DOI:10.1109/JSTARS.2021.3060769.
24. Zhao Z., Yang J., Wang M., et al. The PCA-NDWI Urban Water Extraction Model Based on Hyperspectral Remote Sensing // *Water*. 2024. Vol. 16. Iss. 7. P. 963. DOI:10.3390/w16070963.
25. Sandum H.N., Ørka H.O., Tomic O., et al. Semantic Segmentation of Forest Stands Using Deep Learning // Preprint arXiv.org, 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2504.02471> (дата обращения: 09.06.2025).
26. Lin N., Quan H., He J., et al. Urban Vegetation Extraction from High-Resolution Remote Sensing Imagery on SD-Unet and Vegetation Spectral Features // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 18. P. 4488. DOI:10.3390/rs15184488.
27. Chen P., Li X., Peng Y., et al. WSSGCN: Hyperspectral Forest Image Classification via Watershed Superpixel Segmentation and Sparse Graph Convolutional Networks // *Forests*. 2025. Vol. 16. Iss. 5. P. 827. DOI:10.3390/f16050827.
28. Chen S., Zhang M., Lei F. Mapping Vegetation Types by Different Fully Convolutional Neural Network Structures with Inadequate Training Labels in Complex Landscape Urban Areas // *Forests*. 2023. Vol. 14. Iss. 9. P. 1768. DOI:10.3390/f14091788.
29. Li Y., Min S., Song B., et al. Multisource High-Resolution Remote Sensing Image Vegetation Extraction with Comprehensive Multifeature Perception // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 4. P. 712. DOI:10.3390/rs16040712.
30. Wang B., Yao Y. Mountain Vegetation Classification Method Based on Multi-Channel Semantic Segmentation Model // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 2. P. 256. DOI:10.3390/rs16020256.
31. Tao J., Chen Z., Sun Z., et al. Seg-Road: A Segmentation Network for Road Extraction Based on Transformer and CNN with Connectivity Structures // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 6. P. 1602. DOI:10.3390/rs15061602.
32. Lin S., Yao X., Liu X., et al. MS-AGAN: Road Extraction via Multi-Scale Information Fusion and Asymmetric Generative Adversarial Networks from High-Resolution Remote Sensing Images under Complex Backgrounds // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 13. P. 3367. DOI:10.3390/rs15133367.
33. Zhong B., Dan H., Liu M., et al. FERDNet: High-Resolution Remote Sensing Road Extraction Network Based on Feature Enhancement of Road Directionality // *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17. Iss. 3. P. 376. DOI:10.3390/rs17030376.
34. Chen J., Yang L., Wang H., et al. Road Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images via Local and Global Context Reasoning // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 5. Iss. 17. P. 4177. DOI:10.3390/rs15174177.
35. Mahara A., Khan M.R.K., Deng L., et al. Automated Road Extraction from Satellite Imagery Integrating Dense Depthwise Dilated Separable Spatial Pyramid Pooling with DeepLabV3+ // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Iss. 3. P. 1027. DOI:10.3390/app15031027.

36. Li B., Tang X., Xiao R., et al. Dual Convolutional Network Based on Hypergraph and Multilevel Feature Fusion for Road Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images // International Journal of Digital Earth. 2024. Vol. 17. No. 1. P. 2303354. DOI:10.1080/17538947.2024.2303354.
37. Zhao S., Feng Z., Chen L., et al. DANet: A Semantic Segmentation Network for Remote Sensing of Roads Based on Dual-ASPP Structure // Electronics. 2023. Vol. 12. Iss. 15. P. 3243. DOI:10.3390/electronics12153243.
38. Zhao L., Zhang J., Meng X., et al. Road Extraction Method of Remote Sensing Image Based on Deformable Attention Transformer // Symmetry. 2024. Vol. 16. Iss. 4. P. 468. DOI:10.3390/sym16040468.
39. Zhang Y., Zhang L., Wang Y., et al. AGF-Net: Adaptive Global Feature Fusion Network for Road Extraction from Remote-Sensing Images // Complex & Intelligent Systems. 2024. Vol. 10. P. 4311–4328. DOI:10.1007/s40747-024-01364-9.
40. Ma D., Jiang L., Li J., et al. Water Index and Swin Transformer (WISTE) for Water Body Extraction from Multispectral Remote Sensing Images // GIScience & Remote Sensing. 2023. Vol. 60. No. 1. P. 2251704. DOI:10.1080/15481603.2023.2251704.

АВТОРЫ

Бирюков Никита Андреевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информационно-измерительных систем, факультет геоинформатики
и информационной безопасности

 0000-0001-9856-4696

Поступила 14.06.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.

UDC 528.8:004.62

DOI:10.30533/scidata-2025-16-12



The Impact of High and Super Spatial Resolution Remote Sensing Images Datasets Composition on Training and Accuracy of Geofields Semantic Segmentation Neural Networks on Example of a Different Earth's Surface Classes Recognition

Nikita A. Biryukov¹

AFFILIATIONS

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

4096414@gmail.com

CITATION

Biryukov NA. The Impact of High and Super Spatial Resolution Remote Sensing Images Datasets Composition on Training and Accuracy of Geofields Semantic Segmentation Neural Networks on Example of a Different Earth's Surface Classes Recognition. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 30–57. DOI:10.30533/scidata-2025-16-12.

KEYWORDS

geofield, geofields set, semantic segmentation, dataset composition, class imbalance, neural network, recognition accuracy

ABSTRACT

The remote sensing images and masks datasets that are used for different earth's surface classes recognition tasks can significantly impact neural network models learnability and semantic segmentation results that are received after model training. Datasets composition problematic

usually are not investigated from these datasets point of view as it is viewed as neural network data processing problematic in general in each specific remote sensing data semantic segmentation task. In geofields semantic segmentation context general problematic for object semantic segmentation on aerial and satellite data that includes such main problems as images with different spectral characteristics, images with shadows, images with “different object, same spectrum”, images with incorrect annotation and images with class imbalance borderline cases is determined. Mentioned problems are considered as problems of original geofields set representation in datasets. As result of a different earth’s surface classes semantic segmentation experiment with U-Net, STT and MF-CNN it was determined that class imbalance borderline cases and using images with resolution in which class imbalance is higher than using their crops reduce learning ability and recognition accuracy of neural networks and class imbalance borderline cases deletion based data selection in data preprocessing process leads to accuracy increase and models training time decrease.

REFERENCES

1. Xu R, Mao R, Zhuang F, et al. Building Extraction from Remote Sensing Images Based on Multi-Scale Attention Gate and Enhanced Positional Information. *PeerJ Computer Science*. 2025;11: e2826. DOI:10.7717/peerj-cs.2826.
2. Chen Y, Xie Y, Yao W, et al. U-MGA: a Multi-Module Unet Optimized with Multi-Scale Global Attention Mechanisms for Fine-Grained Segmentation of Cultivated Areas. *Remote Sensing*. 2025;17(5): 760. DOI:10.3390/rs17050760.
3. Cai J, Tao L, Li Y. CM-UNet++: A Multi-Level Information Optimized Network for Urban Water Body Extraction from High-Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*. 2025;17(6): 980. DOI:10.3390/rs17060980.
4. Gui L, Gu X, Huang F, et al. Road Extraction from Remote Sensing Images Using a Skip-Connected Parallel CNN-Transformer Encoder-Decoder Model. *Applied Sciences*. 2025;15(3): 1427. DOI:10.3390/app15031427.
5. Liu Y, Duan Y, Zhang X, et al. FEPA-Net: A Building Extraction Network Based on Fusing the Feature Extraction and Position Attention Module. *Applied Sciences*. 2025;15(8): 4432. DOI:10.3390/app15084432.
6. Zhu B., Yu D., Xiao X., et al. AP-PointRend: An Improved Network for Building Extraction via High-Resolution Remote Sensing Images. *Remote Sensing*. 2025;17(9): 1481. DOI:10.3390/rs17091481.
7. Li X, Yang S, Meng F, et al. LCMorph: Exploiting Frequency Cues and Morphological Perception for Low-Contrast Road Extraction in Remote Sensing Images. *Remote Sensing*. 2025;17(2): 257. DOI:10.3390/rs17020257.
8. Weng Z, Li Q, Zheng Z, et al. SCR-Net: A Dual-Channel Water Body Extraction Model Based on Multi-Spectral Remote Sensing Imagery – A Case Study of Daihai Lake, China. *Sensors*. 2025;25(3): 763. DOI: 10.3390/s25030763.

9. Wu Q, Chen M, Shi H, et al. Algorithm for Detecting Trees Affected by Pine Wilt Disease in Complex Scenes Based on CNN-Transformer. *Forests*. 2025;16(4): 596. DOI:10.3390/f16040596.
10. Wang L, Gao Y, Liu Y, et al. Monitoring Pine Shoot Beetle Damage Using UAV Imagery and Deep Learning Semantic Segmentation under Different Forest Backgrounds. *Forests*. 2025;16(4): 668. DOI:10.3390/f16040668.
11. Biryukov NA, Maiorov AA, Lapchinskaya MP. Semanticheskaya segmentatsiya geopolei s ispol'zovaniem neironnykh setei na primere problematiki vydeleniya zdanii na kosmo- i aerofotosnimkakh [Geofields Semantic Segmentation by Neural Networks on Example of Building Extraction on Satellite and Aerial Images Problematic]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(1): 44–61. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-004.
12. Li J, He W, Cao W, et al. UANet: An Uncertainty-Aware Network for Building Extraction from Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024;62: 5608513. DOI:10.1109/TGRS.2024.3361211.
13. Han R, Fan X, Liu J. EUNet: Edge-Unet for Accurate Building Extraction and Edge Emphasis in Gaofen-7 Images. *Remote Sensing*. 2024;16(13): 2397. DOI:10.3390/rs16132397.
14. Fenglei W, Xin G, Zongze Z, et al. A Boundary-Enhanced Semantic Segmentation Model for Buildings. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2025;18: 5733–5748. DOI:10.1109/JSTARS.2025.3529456.
15. Chen P, Huang H, Ye F, et al. A Benchmark Gaofen-7 Dataset for Building Extraction from Satellite Images. *Scientific Data*. 2024;11: 187. DOI:10.1038/s41597-024-03009-5.
16. Li S, Bao T, Liu H, et al. Multilevel Feature Aggregated Network with Instance Contrastive Learning Constraint for Building Extraction. *Remote Sensing*. 2023;15(10): 2585. DOI:10.3390/rs15102585.
17. Lyu X, Jiang W, Li X, et al. MSAFNet: Multiscale Successive Attention Fusion Network for Water Body Extraction of Remote Sensing Images. *Remote Sensing*. 2023;15(12): 3121. DOI:10.3390/rs15123121.
18. Li M, Hong L, Guo J, et al. Automated Extraction of Lake Water Bodies in Complex Geographical Environments by Fusing Sentinel-1/2 Data. *Water*. 2022;14(1): 30. DOI:10.3390/w14010030.
19. Wang Y, Li S, Lin Y, et al. Lightweight Deep Neural Network Method for Water Body Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images with Multisensors. *Sensors*. 2021;21(21): 7397. DOI:10.3390/s21217397.
20. Wang B, Chen Z, Wu L, et al. SADA-Net: A Shape Feature Optimization and Multiscale Context Information-Based Water Body Extraction Method for High-Resolution Remote Sensing Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022;15: 1744–1759. DOI:10.1109/JSTARS.2022.3146275.

21. Weng Y, Li Z, Tang G, et al. OCNet-Based Water Body Extraction from Remote Sensing Images. *Water*. 2023;15(20): 3557. DOI:10.3390/w15203557.
22. Yu J, Cai Y, Lyu X, et al. Boundary-Guided Semantic Context Network for Water Body Extraction from Remote Sensing Images. *Remote Sensing*. 2023;15(17): 4325. DOI:10.3390/rs15174325.
23. Li M, Wu P, Wang B, et al. A Deep Learning Method of Water Body Extraction from High Resolution Remote Sensing Images with Multisensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2021;14: 3120–3132. DOI:10.1109/JSTARS.2021.3060769.
24. Zhao Z, Yang J, Wang M, et al. The PCA-NDWI Urban Water Extraction Model Based on Hyperspectral Remote Sensing. *Water*. 2024;16(7): 963. DOI:10.3390/w16070963.
25. Sandum HN, Ørka HO, Tomic O, et al. Semantic Segmentation of Forest Stands Using Deep Learning. *Preprint arXiv.org*, 2025. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2504.02471> (Accessed 9 June 2025).
26. Lin N, Quan H, He J, et al. Urban Vegetation Extraction from High-Resolution Remote Sensing Imagery on SD-Unet and Vegetation Spectral Features. *Remote Sensing*. 2023;15(18): 4488. DOI:10.3390/rs15184488.
27. Chen P, Li X, Peng Y, et al. WSSGCN: Hyperspectral Forest Image Classification via Watershed Superpixel Segmentation and Sparse Graph Convolutional Networks. *Forests*. 2025;16(5): 827. DOI:10.3390/f16050827.
28. Chen S, Zhang M, Lei F. Mapping Vegetation Types by Different Fully Convolutional Neural Network Structures with Inadequate Training Labels in Complex Landscape Urban Areas. *Forests*. 2023;14(9): 1768. DOI:10.3390/f14091788.
29. Li Y, Min S, Song B, et al. Multisource High-Resolution Remote Sensing Image Vegetation Extraction with Comprehensive Multifeature Perception. *Remote Sensing*. 2024;16(4): 712. DOI:10.3390/rs16040712.
30. Wang B, Yao Y. Mountain Vegetation Classification Method Based on Multi-Channel Semantic Segmentation Model. *Remote Sensing*. 2024;16(2): 256. DOI:10.3390/rs16020256.
31. Tao J, Chen Z, Sun Z, et al. Seg-Road: A Segmentation Network for Road Extraction Based on Transformer and CNN with Connectivity Structures. *Remote Sensing*. 2023;15(6): 1602. DOI:10.3390/rs15061602.
32. Lin S, Yao X, Liu X., et al. MS-AGAN: Road Extraction via Multi-Scale Information Fusion and Asymmetric Generative Adversarial Networks from High-Resolution Remote Sensing Images under Complex Backgrounds. *Remote Sensing*. 2023;15(13): 3367. DOI:10.3390/rs15133367.
33. Zhong B, Dan H, Liu M, et al. FERDNet: High-Resolution Remote Sensing Road Extraction Network Based on Feature Enhancement of Road Directionality. *Remote Sensing*. 2025;17(3): 376. DOI:10.3390/rs17030376.

34. Chen J, Yang L, Wang H, et al. Road Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images via Local and Global Context Reasoning. *Remote Sensing*. 2023;15(17): 4177. DOI:10.3390/rs15174177.
35. Mahara A, Khan MRK, Deng L, et al. Automated Road Extraction from Satellite Imagery Integrating Dense Depthwise Dilated Separable Spatial Pyramid Pooling with DeepLabV3+. *Applied Sciences*. 2025;15(3): 1027. DOI:10.3390/app15031027.
36. Li BW, Tang XH, Xiao R, et al. Dual Convolutional Network Based on Hypergraph and Multilevel Feature Fusion for Road Extraction from High-Resolution Remote Sensing Images. *International Journal of Digital Earth*. 2024;17(1): 2303354. DOI:10.1080/17538947.2024.2303354.
37. Zhao S, Feng Z, Chen L, et al. DANet: A Semantic Segmentation Network for Remote Sensing of Roads Based on Dual-ASPP Structure. *Electronics*. 2023;12(15): 3243. DOI:10.3390/electronics12153243.
38. Zhao L, Zhang J, Meng X, et al. Road Extraction Method of Remote Sensing Image Based on Deformable Attention Transformer. *Symmetry*. 2024;16(4): 468. DOI:10.3390/sym16040468.
39. Zhang Y, Zhang L, Wang Y, et al. AGF-Net: Adaptive Global Feature Fusion Network for Road Extraction from Remote-Sensing Images. *Complex & Intelligent Systems*. 2024;10: 4311–4328. DOI:10.1007/s40747-024-01364-9.
40. Ma D, Jiang L, Li J, et al. Water Index and Swin Transformer (WISTE) for Water Body Extraction from Multispectral Remote Sensing Images. *GIScience & Remote Sensing*. 2023;60(1): 2251704. DOI:10.1080/15481603.2023.2251704.

AUTHORS

Nikita A. Biryukov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Data Acquisition Systems, Faculty of Geoinformatics and Information Security

 0000-0001-9856-4696

Submitted: June 14, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



О структурах естественного управления процессами денудации в единой системе транзитных тальвегов

Н.В. Соколова¹✉

АФФИЛИАЦИИ

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

✉ sona@ipng.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Соколова Н.В. О структурах естественного управления процессами денудации в единой системе транзитных тальвегов // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, № 2. С. 58–75. DOI:10.30533/scidata-2025-16-09.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

узел транзитных тальвегов, структура естественного управления процессами денудации, режим ротации Земли вокруг своей оси, изменение скорости вращения Земли, геологическая среда, слабое звено транзитного тальвега

АННОТАЦИЯ

В статье показана необходимость создания геотехнологий, адаптированных к непрерывным естественным изменениям геологической среды. Для решения этой проблемы требуются данные о транзитных тальвегах, индикаторах господствующего процесса усиления уплотнения вещества к центру Земли, о характере ее ротации вокруг своей оси и движения по орбите. Выявлены системы транзитных тальвегов на рассматриваемом участке Охотоморской нефтегазоносной провинции, определены границы сфер узлов транзитных тальвегов (структур естественного управления процессами денудации) разного ранга. Установлены особенности развития негативных процессов (землетрясений, зон затопления и др.) с учетом выделенных структур и ротационного фактора. Как показало

исследование, все (и негативные) геологические процессы целесообразно рассматривать в рамках структур естественного управления процессами денудации разного ранга. В этом случае появляется возможность выявления закономерностей и использования этих данных для разработки новых эффективных геотехнологий. Поскольку в узле транзитных тальвегов реализуется первый уровень естественного управления гидро- и литодинамическими потоками (один транзитный, а другой — активный приток к нему), то каждая сфера такого узла обладает определенной степенью уязвимости по отношению к развитию в ней негативных геологических процессов. Полученные новые данные о структурах естественного управления процессами денудации разного ранга могут быть полезными для разработки инновационных геотехнологий, способствующих увеличению эффективности землепользования, оптимизации природно-хозяйственных взаимосвязей, а также препятствующих образованию обширных зон затопления и усилению сейсмичности.

1 Введение

В настоящее время повсеместно фиксируются изменения геологической среды, при этом в каждой точке земной поверхности они качественно и количественно разные. Наряду с подъемом уровня воды в океане из-за таяния ледников наблюдается сокращение площади Каспийского моря, обмеление Волги и ее притоков.

Экологические проблемы актуализируются из-за увеличения числа негативных для человека процессов (землетрясений, наводнений, климатических аномалий и др.). Например, формирование зон глубоких землетрясений определяется реологической расслоенностью литосферы, наличием волноводов и тонко расслоенных сейсмических границ [1]. На земной поверхности действуют противоположные процессы усиления сноса и усиления аккумуляции вещества [2].

В связи с этим сейчас остро стоит проблема разработки инновационных геотехнологий, обеспечивающих одновременно с эксплуатацией природных ресурсов улучшение качеств геологической среды. В России и других странах не хватает научной информации, ориентированной на разработку таких геотехнологий (в том числе и нефтегазовых). В частности, требуются данные о тех непрерывных геодинамических процессах высокого ранга, без которых Земля не может развиваться: господствующем усилении уплотнения вещества к центру Земли, вращении ее вокруг своей оси и движении по орбите.

В ходе изучения геологических процессов высокого ранга [3] были выявлены уровни естественного управления процессами денудации и аккумуляции земного вещества. Такие уровни необходимо учитывать в практической деятельности, т. к. они модифицируют (усиливают или ослабляют) антропогенные трансформации геологической среды.

Целью исследования является получение новой системной информации о закономерностях естественного управления процессами денудации разного ранга, что может быть полезно для разработки инновационных геотехнологий, способствующих увеличению эффективности землепользования.

2 Материалы и методы

Для достижения цели исследования решались следующие задачи:

- 1) выявление системных индикаторов господствующего процесса усиления уплотнения вещества к центру Земли на рассматриваемом участке Охотоморской нефтегазоносной провинции;
- 2) определение структуры естественного управления процессами денудации разного ранга с использованием результатов первого этапа исследований;
- 3) установление особенностей развития негативных процессов (землетрясений, зон затопления и др.) с учетом результатов, полученных на первом и втором этапах, и ротационного фактора (информации об изменениях скорости вращения Земли).

При этом использовались имеющиеся данные [3] о системных индикаторах непрерывных геодинамических процессов высокого ранга, без которых Земля не сможет функционировать, а также сведения о землетрясениях магнитудой 5 и выше в пределах рассматриваемой территории¹ и об изменениях скорости вращения Земли вокруг своей оси².

Исследование непрерывных геологических процессов самого крупного ранга показало, что на земной поверхности функционирует единая система транзитных тальвегов, индикаторов господствующего процесса усиления уплотнения вещества к центру Земли. К зонам транзитных тальвегов тяготеют гидро- и литодинамические потоки разного ранга, в том числе реки. Эти проблемы более подробно рассмотрены в работе [3].

Согласно некоторым исследованиям, речная эрозия является недооцененной причиной землетрясений [4]. Одновременно в многочисленных работах высокого уровня, посвященных проблемам изучения землетрясений, не учитываются индикаторы непрерывного господствующего процесса усиления уплотнения вещества к центру Земли. При этом зафиксированные сейсмические события разной магнитуды¹ приурочены к определенным участкам зон транзитных тальвегов. Так, академик Г.А. Гамбурцев³ исследовал взаимосвязи процессов разруше-

¹ Интерактивная карта землетрясений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sdis.emsd.ru/map/> (дата обращения: 10.01.2025).

² Jones G., Bikos K., Hocken V. A Day is Not Exactly 24 Hours. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://timeanddate.com/time/earth-rotation.html#cals-daylength> (дата обращения: 20.04.2025).

³ Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. 1955. № 1. С. 7–14.

ния и залечивания разрушенных участков, образования новых спаек, в которых вновь формируются сейсмические события.

Структурные геологические карты на территории Западно-Сибирской⁴, Тимано-Печорской и Охотоморской нефтегазоносных провинций свидетельствуют о том, что на глубоких горизонтах, в том числе фундаменте, действуют свои системы транзитных тальвегов, которые работают как дренажные сети. И эти сети связаны с той, что функционирует на земной поверхности.

Самым крупным гидро- и литодинамическим потоком на земной поверхности, который связан с непрерывной ротацией Земли вокруг своей оси и движением ее по орбите (у них одно направление вращения), является течение Западных Ветров (ТЗВ), окаймляющее Антарктиду⁵. Значимость и функции этого мощного природного явления пока недооцениваются.

Моделирование изменений непрерывного движения Земли показывает, что только одна система глобальных гидро- и литодинамических потоков на земной поверхности, состоящая из ТЗВ и двух его активных противоположных (по направлению) притоков в Атлантическом и Тихом океанах, не обеспечивает устойчивость вращения планеты. Кроме того, у Земли имеются две противоположные самые глубокие точки⁵ в Марианской впадине (–10,9 км) и желобе Пуэрто-Рико (–9,2 км), образующие своеобразный балансир, который усиливает устойчивость Земли при ее ротации и движении по орбите в одном направлении. При этом неслучайно транзитный тальveg, в зоне которого функционирует атлантический приток ТЗВ, не проходит через впадину Пуэрто-Рико, а транзитный тальveg, в зоне которого функционирует тихоокеанский приток, проходит через Марианскую впадину. Эта важная особенность взаимосвязи данных противоположных транзитных тальвегов должна быть изучена очень глубоко, поскольку, по-видимому, связана с непрерывной динамикой внутреннего ядра планеты.

При ротации Земли вокруг своей оси фиксируются два режима дренирования земной поверхности [3]. При первом усиливается тихоокеанский приток ТЗВ и одновременно ослабляется атлантический. При втором режиме, наоборот, усиливается атлантический приток ТЗВ и ослабляется тихоокеанский. Фиксируются пределы действия рассматриваемых противоположных притоков ТЗВ в Беринговом проливе.

Выявлены уровни естественного управления процессами денудации. К первому такому уровню относится узел транзитных тальвегов, в котором функционирует транзитный гидро- и литодинамический поток и его активный приток. Фиксируется сфера влияния (воронка) данного узла. В [3] приведена единая система таких сфер впервые с учетом естественного управления процессами

⁴ Геология и полезные ископаемые России: в 6 т. / гл. ред. В.П. Орлов. Т. 2: Западная Сибирь. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 477 с.

⁵ Атлас мира / отв. ред. А.Н. Баранов. М.: ГУГК при СМ СССР, 1954. 284 с.

денудации в каждом узле транзитных тальвегов. Подробно также показаны подобные сферы разного ранга в атлантической воронке первого ранга.

Согласно данным об изменениях скорости вращения Земли⁶, фиксируются периоды усиления вращения и связанные с ними периоды его замедления, которые характеризуют и неровности орбитального пути, по которому движется планета. Известно, что землетрясения часто происходят при замедлении вращения Земли [5].

3 Результаты и обсуждение

Как показали исследования, все геологические процессы, в том числе негативные для человека, целесообразно рассматривать в рамках границ структур естественного управления процессами денудации разного ранга. В этом случае появится возможность выявления их закономерностей и использования этих данных для разработки новых эффективных геотехнологий. В статье [3] показаны особенности развития атлантической сферы узла 1 транзитных тальвегов, расположенного в Южно-Сандвичевой впадине, где соединяются ТЗВ и его атлантический приток. На **рис. 1**, составленном с использованием рис. 1 из статьи [3], на основе Атласа мира⁷ и контурной основы⁸, транзитные тальвеги отображены линиями синего цвета разной толщины.

Тихоокеанская структура естественного управления процессами денудации первого ранга представлена сферой действия узла 2 транзитных тальвегов, где ТЗВ соединяется с его тихоокеанским активным притоком. В данной воронке в соответствующем узле транзитных тальвегов функционирует самый глубокий на земной поверхности базис денудации в Марианской впадине. Подобный узел 3 находится на стыке Индийско-Австралийской и Южно-Австралийской котловин.

На **рис. 1** представлена система сфер узлов транзитных тальвегов разного ранга. Рассматриваемая территория в Охотоморской нефтегазоносной провинции находится в тихоокеанской сфере узла 2 первого ранга; далее — в сферах более низких второго–четвертого рангов с узлом в Марианской впадине, в воронке пятого ранга с узлом транзитных тальвегов в Японской впадине.

В этой сфере развивается и узел 5, с которым связан узел 8 на исследуемой территории, как показано на **рис. 2**, созданном с использованием Атласа мира⁷ на основе физической карты Охотского моря⁹.

6 Jones G., Bikos K., Hocken V. A Day is Not Exactly 24 Hours. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://timeanddate.com/time/earth-rotation.html#calcs-daylength> (дата обращения: 20.04.2025).

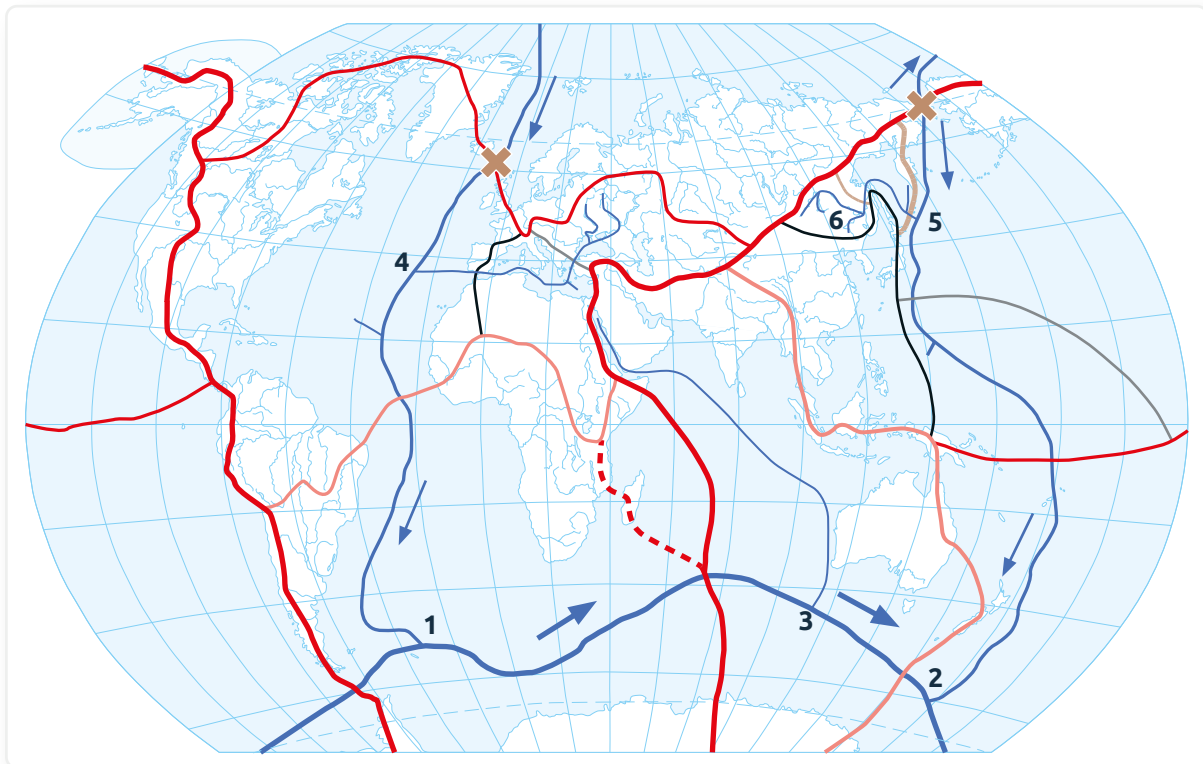
7 Атлас мира / отв. ред. А.Н. Баранов. М.: ГУГК при СМ СССР, 1954. 284 с.

8 Контурная карта мира. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.1maps.ru> (дата обращения: 10.04.2024).

9 Моря России — Охотское море. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-oxotskoe-more/> (дата обращения: 15.05.2025).

Рис. 1 Границы структур естественного управления процессами денудации с учетом транзитных тальвегов разного ранга на земной поверхности

Fig. 1 Boundaries of natural control structures of denudation processes taking into account transit thalwegs on the earth's surface



Условные обозначения

Зоны транзитных тальвегов, в которых функционируют:

- течение Западных Ветров (ТЗВ)
- активные притоки ТЗВ в Атлантическом и Тихом океанах
- притоки разного ранга к активному атлантическому притоку ТЗВ

Границы соподчиненных сфер узлов транзитных тальвегов разного ранга:

- первого
- второго
- третьего
- четвертого
- пятого
- шестого
- седьмого

Направление:

- ➔ ТЗВ (совпадающее с направлением вращения Земли вокруг своей оси)
- ➔ активных притоков ТЗВ

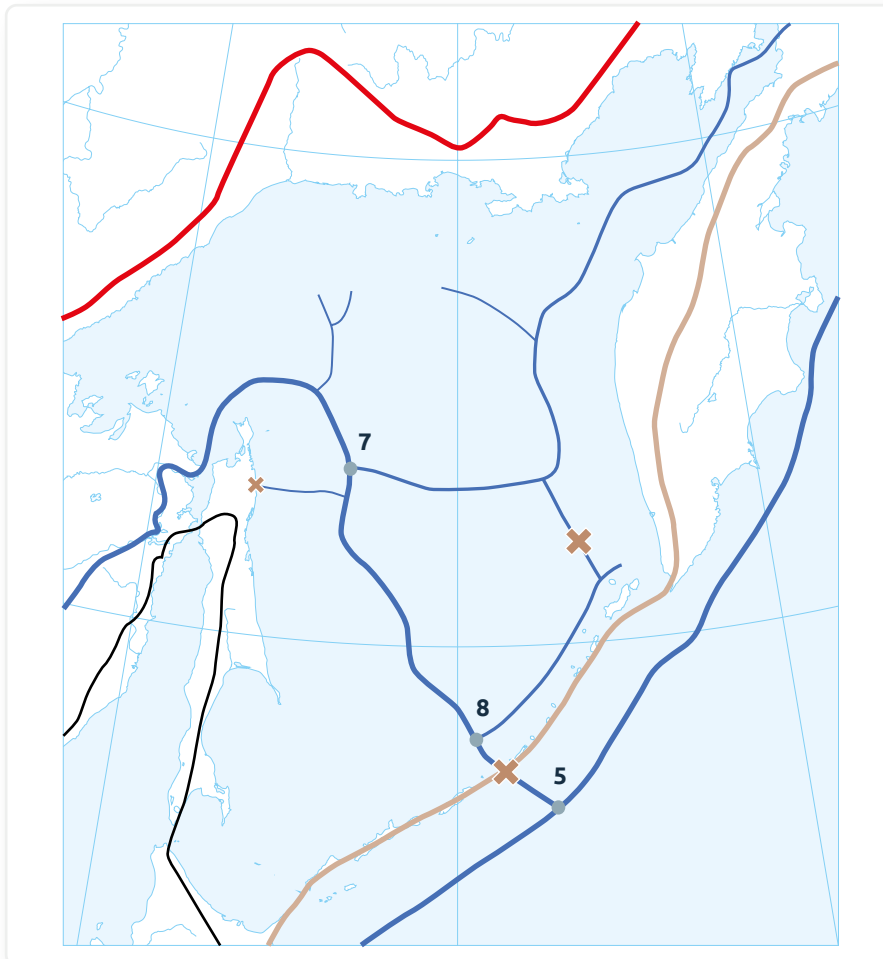
Номера узлов сочленения соподчиненных транзитных тальвегов и гидро- и литодинамических потоков:

- 1 ТЗВ и атлантического активного притока
- 2 ТЗВ и тихоокеанского активного притока
- 3 ТЗВ и его крупного притока в Индийском океане
- 4 атлантического активного притока ТЗВ с его притоком тихоокеанского притока ТЗВ
- 5 тихоокеанского притока ТЗВ с притоком, действующим в Охотском море
- 6 реки Амур с ее притоком Уссури

- ✗ Слабые звенья транзитных тальвегов, от которых зависит развитие сферы самого крупного их узла в котловине Северного Ледовитого океана

Рис. 2 Латеральная дренажная сеть каналов в зонах транзитных тальвегов разного ранга в Охотоморской структуре естественного управления шестого ранга, связанной с тихоокеанским притоком ТЗВ в узле 5

Fig. 2 Lateral drainage network of channels in the zones of transit thalwegs of different ranks in the Okhotsk Sea natural control structure of the 6th rank, associated with the Pacific tributary of the West Wind Drift in node 5



Условные обозначения

— Транзитные тальвеги разного ранга

Границы сфер узлов транзитных тальвегов разного ранга:

- первого
- четвертого
- шестого

Слабые звенья зон транзитных тальвегов разного ранга:

- ✕ между узлами 5 и 8, а также близ берегов полуострова Камчатка (локализация 34 землетрясений)
- ✕ на границе сферы узла транзитных тальвегов низкого ранга (Нефтегорское землетрясение 1995 г.)

Узлы сочленения транзитных тальвегов и гидро- и литодинамических потоков:

- 5** тихоокеанского активного притока ТЗВ и его притока в Охотском море
- 7** потока (с его притоком) в Охотском море во впадине Дерюгина
- 8** относительно крупного потока (с его притоком) в южной части Охотского моря, который напрямую связан с узлами 5 и 7

Коричневыми крестами на **рис. 1** и **2** показаны слабые звенья транзитных тальвегов, где возможна активизация процессов денудации. Отдельные узлы транзитных тальвегов разного ранга на **рис. 2** отображены соответствующими голубыми кружками. Развитие котловины Охотского моря зависит от сферы узла 8 шестого ранга (**рис. 1–2**).

Поскольку в узле транзитных тальвегов реализуется первый уровень естественного управления гидро- и литодинамическими потоками (один транзитный, а другой — активный приток к нему), в такой воронке имеются два входа и один выход, которые могут быть выражены количественно по-разному. С учетом этого такие структуры естественного управления процессами денудации будут более или менее уязвимыми. Например, в такой структуре шестого ранга с узлом 8 эти входы относительно обособлены. Транзитным потоком здесь являются Амур (предел его действия фиксируют границы первого и четвертого ранга — красная и черная линии) и его продолжение через узлы 7, 8, 5. Активные притоки в узлы 7 и 8 гораздо слабее, предел их действия на полуострове Камчатка и на Курильских островах обозначает коричневая линия. Выход из данной сферы фиксируется между узлами 5 и 8, соответствующими островами с учетом зоны отмеченного транзитного тальвега в Охотском море. Таким образом, режим развития каждой такой сферы определен в их единой системе, и его можно оптимизировать в определенных пределах.

Внутри сферы узла 8 шестого (и седьмого) ранга в местной впадине Дерюгина функционирует узел 7 транзитных тальвегов, с которым связано уникальное место. Во-первых, оно проявляется слабым звеном зоны транзитных тальвегов у побережья Камчатки (коричневый крест на **рис. 2**). При этом с учетом [6] данное слабое звено фиксируется здесь и на поверхности фундамента. Во-вторых, только в этом слабом звене и его окрестностях зафиксированы землетрясения¹⁰ магнитудой 5 и выше с очагами на очень больших глубинах (от 440 до 668 км).

Был выбран период времени наблюдений с 2010 года по настоящее время. Местное время рассчитывалось по данным конвертера времени из UTC в часовой пояс Петропавловска-Камчатского¹¹. Рассматривались землетрясения магнитудой 5 и выше. За отмеченный период в Охотском море свыше 70% таких землетрясений¹⁰ зафиксированы в окрестности крупного слабого звена в зоне транзитных тальвегов близ побережья Камчатки (**рис. 2**). Ни одного землетрясения такой магнитуды в отмеченный период не было приурочено к другому более крупному слабому звену между узлами транзитных тальвегов 5 и 8, от динамики погружения которого зависит развитие Охотского моря.

¹⁰ Интерактивная карта землетрясений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sdis.emsd.ru/map/> (дата обращения: 10.01.2025).

¹¹ Datetime360. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://datetime360.com> (дата обращения: 10.01.2025).

Изучение полученной выборки из 34 землетрясений показало, что 20 из них произошли при втором режиме ротации Земли, когда более активным был атлантический приток ТЗВ. 14 землетрясений магнитудой выше 5 зафиксированы при первом режиме ротации Земли, более активном тихоокеанском притоке ТЗВ. Этот режим является компенсационным (но неполным) по отношению ко второму режиму. Больше геодинамических напряжений накапливается при втором отмеченном режиме, и в это время происходят высокомагнитудные сейсмические события в тихоокеанской сфере транзитных тальвегов. Например, 24 мая 2013 года (при замедлении вращения Земли) произошли шесть землетрясений магнитудой от 5,1 до 7,8. Из них пять (в том числе магнитудой 7,8) были при втором режиме ротации планеты. С учетом данных исследования [7], несмотря на глобальность макросейсмического эффекта, землетрясение магнитудой 7,8 тогда ощущалось в ближайших населенных пунктах (Камчатский край) с интенсивностью лишь до 5–6 баллов и поэтому не вызвало разрушений.

Согласно работе [8], замедление вращения планеты сопровождается усилением глобальной сейсмичности с интервалом в несколько десятков лет. На основе некоторых данных¹² выделяются и промежуточные более короткие противоположные периоды увеличения или уменьшения ускорения либо увеличения и уменьшения замедления вращения планеты. Эта информация очень важна, поскольку при замедлении скорости вращения Земли замедляется и ТЗВ. При этом сразу же активизируются два его противоположных притока в Атлантическом и Тихом океанах, усиливается их борьба, и увеличивается сейсмичность определенных участков зон транзитных тальвегов.

Необходимо учитывать также и тот факт, что 6 землетрясений из 34 произошли при ускорении вращения Земли. Как показывают моделирование непрерывного движения Земли, сейсмические данные и данные об изменениях скорости вращения планеты, самые уязвимые моменты для нее могут возникнуть не только при замедлении вращения, но и при очень резком ускорении, при переходах от максимального ускорения к сильному замедлению, и наоборот. Выявляются также особенности изменения вращения Земли на соседних витках орбитального пути в разные годы. Например, наблюдается одинаковый режим изменения скорости вращения Земли (ускорение ее вращения) на одном участке пути, но в разные годы зафиксировано значительное уменьшение его количественных показателей. Одновременно у сопоставляемых по времени и пространству землетрясений может быть разный режим ротации Земли вокруг своей оси. Необходимы фундаментальные исследования неровностей орбиты Земли, которые влияют на изменение скорости вращения планеты.

¹² Jones G., Bikos K., Hocken V. A Day is Not Exactly 24 Hours. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://timeanddate.com/time/earth-rotation.html#cals-daylength> (дата обращения: 20.04.2025).

Как уже отмечалось выше, глубина размещения очагов землетрясений в отмеченном слабом звене транзитных тальвегов очень большая и резко отличается от глубины очагов сейсмических событий в других участках воронок более крупного ранга. Характер дренажа территории Охотоморской котловины на земной поверхности (рис. 1, 2) и поверхности фундамента с учетом Атласа мира¹³ и данных исследования [6] существенно различается: на второй развивается не латеральная, а вертикальная дренажная сеть, связанная с более глубокой латеральной, вероятнее всего на поверхности Мохо. Об этом свидетельствуют фрагментарные данные рельефа поверхности Мохо [9] в рассматриваемом районе, причем дренажная сеть, действующая там в зонах транзитных тальвегов, по направлению противоположна той, которая фиксируется на земной поверхности. Согласно работе [10], существует связь формирования зон разуплотнения в недрах с развитием землетрясений на разных глубинах. Широкое и более детальное изучение систем транзитных тальвегов на глубоких горизонтах позволит выявить системы их взаимодействий и возможный механизм поступления глубинных углеводородных флюидов из мантии на более высокие горизонты и подпитки известных отечественных месторождений нефти и газа, которые развиваются в том числе в пределах атлантической воронки на земной поверхности [3].

Кроме землетрясений, связанных с вертикальными системами дренирования, зарегистрированы и другие, которые зависят от латеральных систем дренирования. Для разработки технологий гашения высокомагнитудных землетрясений (хотя бы частичного) целесообразно каждое из них привязать к сфере определенного крупного узла транзитных тальвегов. Внутри этой сферы выделяются конкретные узлы транзитных тальвегов более низкого ранга, к которым приурочено данное сейсмическое событие. В этом случае будут учтены господствующий процесс усиления уплотнения вещества к центру Земли, особенности ее ротации вокруг своей оси и движения по орбите.

Например, 28 мая 1995 года на Сахалине в 01:04 местного времени произошло крупное Нефтегорское землетрясение магнитудой 7,1 [11]. Это землетрясение случилось при значительном замедлении скорости вращения Земли¹⁴. Выделяются периоды ее замедления и ускорения и особенности этих процессов. Например, после периода увеличения замедления был период уменьшения замедления вращения планеты, который продолжался с 20 по 30 мая 1995 года и который далее сменился периодом увеличения замедления. Можно определить еще одну особенность — преемственность таких показателей на соседних витках в разные годы. В предыдущем 1994 году 28 мая было зафиксировано в отмеченном пространстве меньшее замедление, чем в 1995 году. Период уменьшения

¹³ Атлас мира / отв. ред. А.Н. Баранов. М.: ГУГК при ЦМ СССР, 1954. 284 с.

¹⁴ Jones G., Bikos K., Hocken V. A Day is Not Exactly 24 Hours. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://timeanddate.com/time/earth-rotation.html#cals-daylength> (дата обращения: 20.04.2025).

замедления продолжался при этом с 20 по 28 мая 1994 года. Таким образом, 28 мая 1995 года произошла смена периода увеличения замедления на период его уменьшения, хотя и при больших показателях замедления, что не способствовало устойчивости непрерывного движения Земли.

Одновременно рассматриваемое сейсмическое событие 28 мая 1995 года случилось при первом режиме ротации, когда усиливался тихоокеанский приток ТЗВ. Оно приурочено к зоне транзитного тальвега, связанного с подобным более крупного ранга, проходящим и через впадину Дерюгина (рис. 2, узел 7). Система гидро- и литодинамических потоков и зон транзитных тальвегов, в которой развивалось отмеченное землетрясение (его очаг был на глубине 9 км), совпадает по направлению с данным господствующим в тот момент тихоокеанским притоком ТЗВ, и в ней задействованы местные базисы денудации во впадинах (Марианской, Курильской, Дерюгина).

Рассматриваемое землетрясение развивается в сфере узла транзитных тальвегов р. Пильтун и продолжения р. Кадыланьи в Пильтунском заливе относительно низкого ранга. Оно произошло в пойме р. Кадыланьи в слабом звене сферы узла р. Кадыланьи и ее притока р. Кениги¹⁵ [11]. Кроме того, необходимо отметить наличие в этой системе неслучайного участка транзитного тальвега субмеридионального простираения в проливе Пильтун, что увеличивает силу сноса вещества земной поверхности в зону охотоморского транзитного тальвега с узлами 7 и 8. Отмеченная информация может быть использована при разработке технологии недопущения (гашения) высокомагнитудных землетрясений в данном регионе. Для этого требуются детальные исследования системы гидро- и литодинамических потоков и транзитных тальвегов, к которой приурочено данное землетрясение, с учетом ротационного фактора. Такая технология должна включать определение оптимальных превышений между местным базисом денудации в узле р. Кадыланьи — Кениги и слабым звеном на выходе из сферы этого узла. Одновременно необходимо учитывать, что барьерная зона в слабом звене границы сферы узла транзитных тальвегов с р. Кадыланьи и Кениги усиливается из-за формирования там на глубине нефтегазовых залежей. После очередного землетрясения слабое звено в барьерной зоне опять начинает развиваться в условиях усиления барьера. В результате на одном из будущих орбитальных витков и при первом режиме ротации планеты ситуация с землетрясением, возможно более разрушительным, может повториться. Поэтому для оптимизации количественных параметров данной барьерной зоны необходимо учитывать также системы транзитных тальвегов на глубоких горизонтах до глубины 9 км (очага землетрясения).

Кроме высокомагнитудных сейсмических событий, негативными для социума являются процессы формирования обширных зон затопления (сезонных

¹⁵ Атлас мира / отв. ред. А.Н. Баранов. М.: ГУГК при СМ СССР, 1954. 284 с.

и внесезонных). Эти зоны также связаны с развитием сфер узлов транзитных тальвегов разного ранга, с изменениями скорости понижения местных базисов денудации в них из-за влияния ротационного фактора. Например, узел р. Амур и Уссури (**рис. 1**, узел б) имеет определенную сферу своего влияния (она ограничена красной жирной и коричневой тонкой линиями). Мониторинг изменений превышений между местным базисом денудации и слабым звеном данной сферы с учетом ротационного фактора даст возможность определить режим формирования зоны затопления в узле б и разработать мероприятия по недопущению ее образования или значительному уменьшению затопления. Для разработки таких технологических решений необходимо использовать репрезентативные картографические материалы более крупного масштаба, которые позволят уточнить положение выделяемых границ сфер влияния узлов транзитных тальвегов, а также определить с достаточной точностью элементы будущих геотехнологий.

Необходимо также проводить мониторинг возможных изменений ранга отдельных участков границ отмеченных сфер с использованием новейших батиметрических данных (на слабые звенья транзитных тальвегов) и ротационного фактора. Например, участок границы первого ранга между атлантической и тихоокеанской воронками в Индийском океане от архипелага Чагос ослабляется из-за усиления атлантического притока ТЗВ. Данная граница между сферами первого ранга проходит по хребтам Кергелен, частично по Центрально-Индийскому до архипелага Чагос. С учетом изобаты 4000 м на карте¹⁶ современную границу далее необходимо проводить от архипелага Чагос не через о. Мадагаскар (вследствие усиления проницаемости бывшего барьера: см. красную пунктирную линию на **рис. 1**), а по Аравийско-Индийскому подводному хребту.

На **рис. 1** показаны слабые звенья транзитного тальвега, от которых зависит развитие котловины Северного Ледовитого океана. Такая информация позволит исследовать развивающиеся в этом регионе гигантские внутренние волны. Согласно исследованию [12], эта проблема очень актуальна в настоящее время для пролива Карские Ворота. В работе [13] отмечается, что опасные волны сами по себе способствуют более быстрому сокращению ледового покрова, и в будущем это приведет к увеличению их высоты. Показаны также два современных ареала их формирования в Северном Ледовитом океане. С учетом системы транзитных тальвегов эти ареалы не случайны, они зависят от режима ротации Земли вокруг своей оси. Значение данной проблемы трудно переоценить, она требует оперативного создания новых технологических решений по недопущению увеличения высоты таких волн в отмеченном регионе с учетом полученных новых данных.

¹⁶ Атлас мира / отв. ред. А.Н. Баранов. М.: ГУГК при СМ СССР, 1954. 284 с.

4 Выводы

Исследования показали, что функционирует единая система транзитных тальвегов и сфер влияния их узлов — структур естественного управления процессами денудации разного ранга. Рассмотрена часть этой системы — Охотоморская структура управления процессами денудации с привязанными к ее элементам землетрясения магнитудой 5 и выше. От непрерывной динамики такой системы напрямую зависят негативные процессы денудации и аккумуляции.

Для получения данных целесообразно использовать географические и структурные геологические карты разного масштаба, информацию об изменениях скорости вращения Земли, а также большие массивы целенаправленных геодезических измерений, связанных со сферами узлов транзитных тальвегов.

Структуры естественного управления процессами денудации разного ранга позволяют в результате регулирования их количественных параметров оптимизировать природно-антропогенные взаимосвязи. Увеличение превышений между базисом денудации в узле транзитных тальвегов и их слабым звеном на выходе такой структуры способствует формированию зоны затопления в ней, а уменьшение таких превышений может привести к развитию высокомагнитудного сейсмического события в слабом звене на выходе структуры. В процессе использования таких структур появятся и другие их количественные показатели, требующие оптимизации.

Таким образом, сами по себе сферы (воронки) узлов транзитных тальвегов разного ранга обладают возможностями для создания в них зон затопления. Последние очень опасны и для нефтегазовых объектов, т. к. изменения условий функционирования могут способствовать разрушению данных объектов и усилению загрязнения прилегающих территорий. Поэтому необходимы новые чувствительные технологии недопущения формирования обширных зон затопления на конкретных территориях. Мониторинг изменений превышений между узлом транзитных тальвегов определенного ранга и их слабым звеном на выходе сферы влияния данного узла позволит выявить (и технологически поддерживать) экологически оптимальные значения этого параметра для конкретной территории, чтобы там не проявлялись ощутимые негативные процессы затопления территорий.

Одновременно система слежения за изменениями таких параметров в смежных подобных сферах с учетом ротационного фактора даст возможность определить оптимальные параметры эрозионного расчленения потенциально опасного с точки зрения сейсмичности слабого звена транзитного тальвега между двумя его узлами и разработать технологические решения, не допускающие возникновения там высокомагнитудных землетрясений.

Полученная системная информация о структурах естественного управления процессами денудации разного ранга является основой для разработки новых экологически чистых геотехнологий и системного мониторинга развития земных недр.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 125021302095-2).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И. и др. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70–82.
2. Орлов В.И. Динамическая география. М.: Научный мир, 2006. 594 с.
3. Соколова Н.В. Мониторинг геологических процессов высокого ранга с использованием системы транзитных тальвегов // Пространственные данные: наука и технологии. 2024. Т. 15, № 2. С. 43–58. DOI:10.30533/scidata-2024-15-10.
4. Gallen S.F., Thigpen J.R. Lithologic Controls on Focused Erosion and Intraplate Earthquakes in the Eastern Tennessee Seismic Zone // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. Iss. 18. P. 9569–9578. DOI:10.1029/2018GL079157.
5. Bendick R., Bilham R. Do Weak Global Stresses Synchronize Earthquakes? // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. Iss. 16. P. 8320–8327. DOI:10.1002/2017GL074934.
6. Маргулис Л.С. Нефтегеологическое районирование и оценка нефтегазовых ресурсов дальневосточных морей // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009. Т. 4, № 2. С. 1–17. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ngtp.ru/rub/5/23_2009.pdf (дата обращения: 21.04.2025).
7. Чеброва А.Ю., Абубакиров И.Р., Гусев А.А. и др. Охотоморское-III землетрясение 24 мая 2013 г. с $M_w = 8.3$, $I_0 = 6$ (Охотское море) // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 22: 2013 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 377–396. DOI:10.35540/1818-6254.2019.22.34.
8. Сасорова Е.В., Левин Б.В. О связи вариаций скорости вращения Земли и ее сейсмической активности. Вступление Земли в новую фазу уменьшения угловой скорости вращения // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2017. № 4 (20). С. 91–100. DOI:10.18454/2079-6641-2017-20-4-91-100.
9. Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Мелкофокусная сейсмичность Охотского моря и ее вероятная тектоническая природа // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 1. С. 19–38.
10. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Дилатантные структуры и электромагнитные возмущения УНЧ диапазона на этапах подготовки и развития крупного сейсмического события // Вестник ОНЗ РАН. 2010. Т. 2, NZ6027. С. 202–213. DOI:10.2205/2010NZ000045.

11. Оскорбин Л.С., Поплавский А.А., Стрельцов М.И. и др. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года ($M_w = 7,1$) // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году: сборник научных трудов. М.: ГС РАН, 2001. С. 170–182.
12. Kozlov I.E., Kopyshov I.O., Frey D.I., et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 24. P. 5769. DOI:10.3390/rs15245769.
13. Thomson J., Rogers W.E. Swell and Sea in the Emerging Arctic Ocean // Geophysical Research Letters. 2014. Vol. 41. Iss. 9. P. 3136–3140. DOI:10.1002/2014GL059983.

АВТОРЫ

Соколова Надежда Васильевна

ФГБУН «Институт проблем нефти и газа РАН» (ИПНГ РАН), Москва, Россия

Центр инновационных нефтегазовых технологий

канд. техн. наук

 0000-0002-4381-4667

Поступила 15.06.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.

UDC 551.4

DOI:10.30533/scidata-2025-16-09



On the Structures of Denudation Processes Natural Control in a Unified System of Transit Thalwegs

Nadezda V. Sokolova¹✉

AFFILIATIONS

¹ Oil and Gas Research Institute of RAS, Moscow, Russia

✉ sona@ipng.ru

CITATION

Sokolova NV. On the Structures of Denudation Processes Natural Control in a Unified System of Transit Thalwegs. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 58–75. DOI:10.30533/scidata-2025-16-09.

KEYWORDS

node of transit thalwegs, structure of denudation processes natural control, Earth's rotation mode around its axis, change in the Earth's rotation speed, geological environment, weak link of transit thalweg

ABSTRACT

The article shows the need for create geotechnologies adapted to continuous natural changes in the geological environment. To solve this problem, data are required on transit thalwegs, indicators of the prevailing process of matter increasing compaction to the Earth center, on the character planet rotation around its axis and movement along its orbit. Systems of transit thalwegs have been identified in the considered area of the Okhotsk Sea oil and gas province. Taking them into account, the boundaries of the transit thalwegs nodes spheres (structures natural control of different ranks denudation processes) were determined. The features of the negative processes development (earthquakes, flood zones, etc.) have been established taking into account

the identified structures and the rotation factor. As studies have shown, it is advisable to consider all (including negative) geological processes within the framework of structures natural control of different ranks denudation processes. In this case, it becomes possible to identify their patterns and use these data to develop new effective geotechnologies. Since the first level of hydro- and lithodynamic flows natural control is realized in the node thalwegs (one is transit, the other is an active inflow to it), each sphere has a certain degree of vulnerability with respect to the development of negative geological processes in it. The new data obtained on the natural control structures of different ranks denudation processes can be useful for the development of innovative geotechnologies that contribute to increasing the land use efficiency, preventing extensive flood zones and increased seismicity, and optimizing natural and economic relationships.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was completed within the framework of the state assignment (topic No. 125021302095-2).

REFERENCES

1. Pavlenkova NI, Kashubin SN, Gontovaya LI, et al. Glubinnoe stroenie i geodinamika Okhotomorskogo regiona [Deep Structure and Geodynamics of the Okhotsk Sea Region]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2018;76: 70–82. (In Russian).
2. Orlov VI. Dinamicheskaya geografiya [Dynamic Geography]. Moscow: Nauchnyi mir; 2006. 594 p.
3. Sokolova NV. Monitoring geologicheskikh protsessov vysokogo ranga s ispol'zovaniem sistemy tranzitnykh tal'vegov [Monitoring of High-Rank Geological Processes Using the System of Transit Thalwegs]. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2024;15(2): 43–58. DOI:10.30533/scidata-2024-15-10.
4. Gallen SF, Thigpen JR. Lithologic Controls on Focused Erosion and Intraplate Earthquakes in the Eastern Tennessee Seismic Zone. *Geophysical Research Letters*. 2018;45(18): 9569–9578. DOI:10.1029/2018GL079157.
5. Bendick R, Bilham R. Do Weak Global Stresses Synchronize Earthquakes? *Geophysical Research Letters*. 2017;44(16): 8320–8327. DOI:10.1002/2017GL074934.
6. Margulis LS. Neftegeologicheskoe raionirovanie i otsenka neftegazovykh resursov dal'nevostochnykh morei [Oil and Gas Zoning and Assessment of Oil and Gas Resources of the Far Eastern Seas]. *Oil and Gas Geology. Theory and Practice*. 2009;4(2): 1–17. Available from: https://ngtp.ru/rub/5/23_2009.pdf (Accessed 21 April 2025).
7. Chebrova AYU, Abubakirov IR, Gusev AA, et al. Okhotomorskoe-III zemletryasenie 24 maya 2013 g. s Mwreg = 8.3, I0 = 6 (Okhotskoe more) [The Sea of Okhotsk-III Earthquake of May 24, 2013 with Mwreg = 8.3, I0 = 6 (Sea of Okhotsk)]. *Earthquakes of Northern Eurasia*. Vol. 22: 2013. Obninsk: Geophysical Survey of Russia Academy of Sciences; 2019: 377–396. DOI:10.35540/1818-6254.2019.22.34.
8. Sasorova EV, Levin BV. O svyazi variatsii skorosti vrashcheniya Zemli i ee seismicheskoi aktivnosti. Vstuplenie Zemli v novuyu fazu umen'sheniya uglovoi skorosti

- vrashcheniya [On the Relationship between Variations in the Earth's Rotation Velocity and Its Seismic Activity. The Earth's Entry into a New Phase of Decreasing Angular Velocity of Rotation]. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2017;4(20): 91–100. DOI:10.18454/2079-6641-2017-20-4-91-100.
9. Tikhonov IN, Lomtev VL. Melkofokusnaya seismichnost' Okhotskogo morya i ee veroyatnaya tektonicheskaya priroda [Shallow-Focus Seismicity of the Sea of Okhotsk and Its Probable Tectonic Nature]. *Problems of Engineering Seismology*. 2014. 41(1): 19–38.
 10. Sobisevich LE, Sobisevich AL. Dilatatsionnye struktury i elektromagnitnye vozmushcheniya UNCH diapazona na etapakh podgotovki i razvitiya krupnogo seismicheskogo sobytiya [Dilatancy Structures and Electromagnetic Disturbances of the ULF Range at the Stages of Preparation and Development of a Large Seismic Event]. *Newsletters of the Department of Earth Sciences*. 2010;2(Z6027): 202–213. DOI:10.2205/2010NZ000045.
 11. Oskorbin LS, Poplavsky AA, Streltsov MI, et al. Neftegorskoe zemletryasenie 27(28) maya 1995 goda ($M_w = 7,1$) [Neftegorsk Earthquake of May 27(28), 1995 ($M_w = 7.1$)]. *Earthquakes of Northern Eurasia in 1995: Collection of Scientific Papers*. Moscow: GS RAS; 2001: 170–182.
 12. Kozlov IE, Kopyshov IO, Frey DI, et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean. *Remote Sensing*. 2023;15(24): 5769. DOI:10.3390/rs15245769.
 13. Thomson J, Rogers WE. Swell and Sea in the Emerging Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 2014;41(9): 3136–3140. DOI:10.1002/2014GL059983.

AUTHORS

Nadezda V. Sokolova

Oil and Gas Research Institute of RAS, Moscow, Russia
Center for Innovative Oil and Gas Technologies
PhD in Engineering

 0000-0002-4381-4667

Submitted: June 15, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



Рекомендации по методике обработки ГНСС-измерений на основе анализа точности Московской геодезической сети

Д.Н. Филонов¹✉

АФФИЛИАЦИИ

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево (Московская область), Россия
✉ filonov_dn@vniiftri.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Филонов Д.Н. Рекомендации по методике обработки ГНСС-измерений на основе анализа точности Московской геодезической сети // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, №2. С. 76–97. DOI:10.30533/scidata-2025-16-07.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

обработка ГНСС-измерений, ГНСС-пункт, сеть, программное обеспечение, уравнивание, анализ, сценарий обработки, параметр обработки, точность, разность координат, нормальная высота

АННОТАЦИЯ

В настоящее время существует множество программных комплексов обработки ГНСС-измерений. Наиболее известны такие, как Justin, GIODIS, Trimble Business Center, специализированные программы для различных типов приемников, Vernese и т. д. Для обработки локальных (отчасти региональных) ГНСС-сетей подходит программное обеспечение Justin, сочетающее в себе необходимые инструменты для постобработки данных GPS и ГЛОНАСС, автоматически образующее связи между перекрывающимися по времени интервалами наблюдений и формирующее векторы, которые показываются в картографическом окне сразу после импорта файлов измерений. Однако в руководстве пользователя программного обеспечения не освещены конкретные моменты и особенности методики

обработки ГНСС-измерений, не всегда поясняются параметры, значения при выборе определенного сценария обработки ГНСС-измерений. В данной статье рассматриваются различные сценарии обработки ГНСС-измерений, заложенные в программное обеспечение, разбираются методики обработки с получением конкретных результатов и анализа точности вычисления при выполнении наблюдений в неблагоприятных условиях (экранирование, отражение сигнала от окружающих объектов, недостаточное количество спутников, плохая геометрия созвездия и т. п.). Приводятся рекомендации по различным этапам обработки ГНСС-измерений.

1 Введение

Целью исследования является разбор различных методик (сценариев) обработки ГНСС-измерений, определение особенностей математико-алгоритмического процесса на основе анализа точности полученных результатов. Выявляются также недостатки программного обеспечения на различных промежуточных этапах обработки ГНСС-данных.

Многие пользователи программных комплексов обработки ГНСС-измерений не до конца понимают математико-алгоритмические процессы, заложенные в эти программы, и не используют весь спектр их действий. В итоге результаты обработки и уравнивания ГНСС-сетей получаются разными. В связи с этим необходимо определить оптимальную технологию обработки и уравнивания ГНСС-измерений.

В процессе исследования было выявлено несовершенство процедур и установленных параметров обработки и уравнивания ГНСС-сетей, а также проведена оценка различных неблагоприятных факторов, влияющих на точность результатов (неточность эфемерид, геометрический фактор, влияние тропосферы и ионосферы).

На каждом этапе исследований осуществлялась метрологическая оценка полученных результатов.

2 Материалы и методы

ГНСС-наблюдения были проведены 23, 24 и 25 декабря 2022 года синхронно на ГНСС-пунктах Менделеево, Одинцово, Орехово-Зуево, Клин с частотой 1 с. на протяжении 24 часов непрерывно. В результате наблюдений получены навигационные и измерительные файлы длительностью 1 ч. по каждому пункту сети.

Для эксперимента были выбраны данные трех дней ГНСС-наблюдений с 23 по 25 декабря 2022 года, установлен временной интервал 13–14 часов и 1–2 часа по Всемирному координированному времени (UTC). Критерием выборки стало максимально возможное изменение геометрического фактора и группировки спутников с течением времени. В качестве исходных используются навигационные эфемериды (файлы *.g и *.n) и данные измерений (файл *.o).

Выбранные ГНСС-пункты уравниваются в режиме фиксированного решения. Последнее в дальнейшем потребуется для сравнения разностей координат, длин и среднеквадратического отклонения (СКО) с выбранным (экспериментально опробованным) способом обработки и уравнивания ГНСС-измерений.

Параметры обработки ГНСС-данных, установленные для предварительного анализа, приведены в **табл. 1**. Параметры тропосферы выбраны приближенно и максимально соответствуют климатическим условиям дат ГНСС-наблюдений: модель Justin, давление 990 гПа, температура –20 °С, влажность 70 %.

Таблица 1 Параметры обработки ГНСС-данных

Table 1 GNSS data processing parameters

Параметр обработки	Значение
Минимальный размер выборки, эпоха	1
Максимальный разрыв, эпоха	300
Критерий для статики (СКО), м	5,00; 2,5
Угол отсечки, °	15
Допуск для статики и O-файлов, м	5,00; 2,5
Автостарт	обработка / уравнивание
Пересчет времени приемника	–
Время	UTC
Координатная система	WGS-84

Рассмотрим некоторые критерии оценки результатов обработки и уравнивания ГНСС-измерений.

Статистические критерии эффективны, когда ошибки измерений соответствуют гипотезе о модели распределения. Для более длинных линий (свыше 30 км) велико влияние систематических ошибок, которые усредняются только на периодах измерений свыше четырех часов [1].

Коэффициент критерия Фишера является главной характеристикой фиксированного решения (сценарий Auto). Он указывается в процентах и вычисляется на основании контраста решения и доверительного интервала, равного 95 %.

Коэффициент статистического критерия разрешения неоднозначности Фишера вычисляется на основании величины контраста и числа степеней свободы решения.

Контраст решения (коэффициент надежности решения) является отношением сумм квадратов невязок фазовых измерений двух наилучших, т. е. имеющих минимальные суммы квадратов невязок, наборов целочисленных решений неоднозначностей фазовых измерений. Контраст решения получается методом LAMBDA на основании преобразований ковариационной матрицы решения систем линейных уравнений по методу наименьших квадратов [2]. Однако высокий коэффициент контрастности не является надежной оценкой достоверности разрешения неоднозначности длинных линий на коротких периодах наблюдений. В таком случае для проверки решения целесообразно разделить сеанс наблюдений на две части, обработать их поочередно и сравнить результаты. В обработке следует добиваться получения коэффициента контрастности 95–100%. Для этого лучше всего использовать графики невязок решения, чтобы выявлять спутники с грубыми измерениями или же периоды, когда измерения имели аномальные отклонения.

Фиксированное решение с коэффициентом свыше 70% тоже может быть достоверным, если количество отбракованных измерений мало, а число спутников, использованных в обработке, более 7. Причина ошибок обработки заключается в трудности автоматической отбраковки грубых измерений, если их количество превышает треть всех данных, поэтому в ручном режиме практически всегда можно добиться уверенного фиксированного решения [1].

Остановимся на некоторых особенностях и сценариях обработки ГНСС-измерений, реализуемых в различных программных комплексах.

Используются следующие сценарии обработки ГНСС-данных: Auto, Code, L1&L2, Only L1, Only L2, Wide Lane, Narrow Lane. Охарактеризуем некоторые из них.

Как правило, совместное решение по сценариям Code и Auto (фиксированное решение) применяется в пакетной обработке ГНСС-сети после сценария «Предобработка». Сценарий Float (плавающее решение) используется выборочно для отдельных векторов сети после обработки Code.

Решение L1&L2 основано на одновременном вычислении неоднозначностей по первой и второй частотам и в отличие от решений, связанных с комбинациями данных, во-первых, позволяет использовать все имеющиеся данные, во-вторых, является наиболее эффективным при уточнении весов путем последовательных приближений [1]. Хорошей проверкой обоснованности применения режима L1 & L2 является отдельная обработка в режимах L1 и L2. Основное ограничение метода L1 & L2 на этапе определения неоднозначностей — неточность оценки поправки, определяемой с помощью навигационной информации по ионосферной модели. Окончательным этапом обработки в режиме L1 & L2 является решение, полученное на основе формирования свободной от ионосферы комбинации.

Линейная комбинация Wide Lane состоит из измерений на различных частотах, которые в общем случае имеют различную точность, следовательно,

преимущество более высокоточных данных теряется. Другая проблема решения Wide Lane заключается в том, что измерения по первой и второй частотам часто не совпадают между собой по времени, поэтому часть данных пропадает [1].

Перейдем к технологии экспериментальной обработки ГНСС-измерений. После обработки ГНСС-сети в целом (предобработка, обработка по кодовым измерениям, обработка по фиксированному решению) на первом этапе выбрана линия (вектор) Одинцово — Менделеево. **Для обработки используются следующие сценарии:**

- Float;
- L1 & L2;
- Code;
- отдельно L1 и L2;
- Narrow Lane;
- Wide Lane.

По результатам обработки ГНСС-измерений составляется таблица сравнения полученных результатов по сценариям и базовым линиям, где приводятся координаты, разности координат, нормальные высоты, СКО определения координат и длин.

На следующем этапе исследований выбираются два оптимальных по точности полученных результатов сценария, которые используются для обработки трех выбранных линий (векторов) ГНСС-сети. По полученным невязкам базовых линий исключаются грубые ошибки, и снова уравнивается сеть ГНСС-пунктов. Проводится сравнительный анализ полученных результатов и графиков геометрического фактора по всем выбранным векторам, датам и временным интервалам.

Результаты приводятся в таблице по сценариям обработки: Auto, выбранный сценарий и выбранный сценарий с исключением грубых измерений по полученным невязкам.

На завершающем этапе исследования ГНСС-данных проводится пространственно-временной анализ изменения высот выбранных пунктов сети после обработки фиксированным способом с ужесточением начальных параметров обработки (примерно в два раза — критерий для статики и O-файлов 2,5 м). При этом изначальные параметры (система координат, тропосферная модель с метеопараметрами, угол отсечки) не меняются. Используются ГНСС-измерения длительностью 1 ч. с дискретностью измерений 1 с. (3600 измерений за 1 ч.) и навигационные эфемериды. Анализируются полученные значения отклонений от суточной средней нормальной высоты выбранных ГНСС-пунктов на протяжении трех суток подряд.

В заключение приводятся оценка полученных результатов и рекомендации по обработке ГНСС-наблюдений.

3 Результаты

Продемонстрируем результаты расчета для одночасовых интервалов ГНСС-наблюдений. На основании полученных результатов для всех сценариев обработки на временном интервале 1 ч. выберем два более точных сценария.

Из полученных результатов обработки ГНСС-измерений (**табл. 2**) следует, что полученные коэффициенты контрастности (в процентах и в числовом виде) значительно изменяются в зависимости от сценария и времени обработки ГНСС-измерений. Это свидетельствует о существенном изменении коэффициента надежности полученного результата (от невысокой надежности и достоверности до высокой вероятности надежности результата).

Стабильно высокие показатели у сценария Auto. По сценариям L1 и L2 (отдельно), Wide Lane, Narrow Lane процент отбраковки данных меньше 5%. По сценариям Float и Code получился неопределенный результат (почти нулевой коэффициент) — решение нестабильное, ненадежное (использовать не рекомендуется). По сценарию L1&L2 сравнительно высокий коэффициент надежности, но в дневном интервале наблюдений (13–14 ч.) 24 декабря большой процент отбраковки измерений (около 20%).

Из анализа **табл. 2** и графиков оценки точности (**рис. 1**) следует, что наиболее приемлемыми по предварительной точности полученных результатов являются сценарии обработки L1 & L2 и Auto. Следовательно, используя эти сценарии обработки ГНСС-измерений, можно получить более точные координаты, высоты и расстояния по выбранным трем линиям ГНСС-измерений (Одинцово — Менделеево, Орехово-Зуево — Менделеево и Клин — Менделеево).

Согласно Государственной поверочной схеме для координатно-временных средств измерений¹ [3], для сети спутниковых и измерительных систем, непрерывно действующих в диапазоне длин от 1 до 200 км, предел допускаемой абсолютной погрешности приращения координат S_i составляет от 10 до 60 мм. Из **табл. 2** видно, что эта погрешность не превышает 60 мм для режима постобработки, за исключением сценария обработки ГНСС-измерений Code.

¹ Государственная поверочная схема для координатно-временных средств измерений: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 июня 2024 г. № 1374. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/565765> (дата обращения: 17.06.2025).

Таблица 2 Ведомость результатов по линии Одинцово — Менделеево

Table 2 Statement of results for the line Odintsovo – Mendeleevo

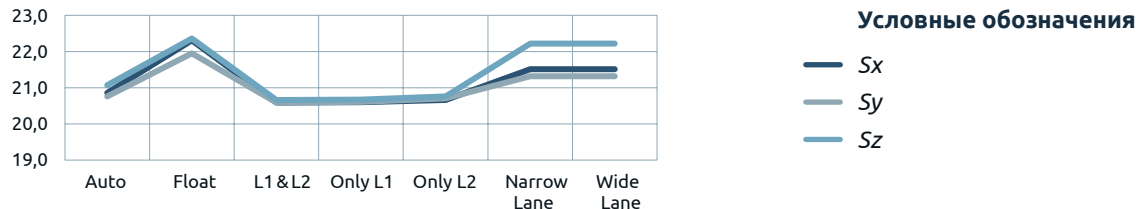
Дата и время	Параметр	Результаты вычислений							
		Auto	Float	L1&L2	Code	Only L1	Only L2	Narrow Lane (L1+L2)	Wide Lane
23.12.2022, 1–2 ч.	Разность координат dx, dy, dz , м	-35 918,5083 10 865,0090 14 818,0437	-35 918,4844 10 864,9906 14 818,0516	-35 918,5326 10 865,0275 14 818,0416	-35 918,5218 10 864,9828 14 817,9582	-35 918,5160 10 865,0285 14 818,0489	-35 918,5286 10 865,0422 14 818,0444	-35 918,5047 10 864,9545 14 818,0090	-35 918,5047 10 864,9545 14 818,0090
	Расстояние / S_i , м	40 345,5335 / 0,0362	40 345,5102 / 0,0384	40 345,5594 / 0,0357	40 345,5071 / 0,1131	40 345,5476 / 0,0357	40 345,5608 / 0,0358	40 345,5029 / 0,0375	40 345,5029 / 0,0375
	Нормальная высота, м	224,3417 183,0097	224,3417, 183,0206	224,3417, 183,0036	224,3417 182,9239	224,3417 183,0174	224,3417 183,0127	224,3417 182,9639	224,3417 182,9639
	S_x, S_y, S_z , м	2,086E-2 2,076E-2 2,107E-2	2,231E-2 2,195E-2 2,236E-2	2,059E-2 2,059E-2 2,066E-2	6,523E-2 5,070E-2 7,720E-2	2,060E-2 2,061E-2 2,067E-2	2,066E-2 2,071E-2 2,076E-2	2,151E-2 2,132E-2 2,222E-2	2,151E-2 2,132E-2 2,222E-2
	Результирующее СКО, м	0,0123	0,0121	0,0158	0,5205	0,0120	0,0187	0,0263	0,0263
	Коэффициент, %	99,98	0,00	96,75	0,00	100,00	99,92	99,99	99,99
	Контраст	1,506E+1	0,000E+0	3,736E+0	0,000E+0	2,722E+1	1,236E+1	1,537E+1	1,537E+1
24.12.2022, 13–14 ч.	Разность координат dx, dy, dz , м	-35 918,4628 10 865,0419 14 818,0610	-35 918,5199 10 864,9967 14 817,9312	-35 918,5754 10 865,0354 14 818,0580	-35 918,4971 10 864,9998 14 817,9013	-35 918,5512 10 865,0402 14 818,0622	-35 918,6026 10 865,0419 14 818,0793	-35 918,4049 10 865,0059 14 817,9652	-35 918,3790 10 865,0235 14 818,0078
	Расстояние / S_i , м	40 345,5082 / 3,819E-2	40 345,4993 / 4,030E-2	40 345,6057 / 3,604E-2	40 345,4688 / 1,160E-1	40 345,5870 / 3,600E-2	40 345,6394 / 3,614E-2	40 345,4119 / 4,074E-2	40 345,4092 4,071E-2
	Нормальная высота, м	222,5498 181,2662	222,5498 181,1180	222,5498 181,2116	222,5498 181,1044	222,5498 181,2275	222,5498 181,2195	222,5498 181,2002	222,5498 181,2530
	S_x, S_y, S_z , м	2,181E-2 2,148E-2 2,283E-2	2,342E-2 2,235E-2 2,399E-2	2,073E-2 2,072E-2 2,097E-2	6,322E-2 4,683E-2 8,019E-2	2,069E-2 2,072E-2 2,094E-2	2,074E-2 2,078E-2 2,106E-2	2,311E-2 2,242E-2 2,496E-2	2,309E-2 2,242E-2 2,493E-2
	Результирующее СКО, м	0,0161	0,0147	0,0194	0,8333	0,0161	0,0180	0,0323	0,0329
	Коэффициент, %	97,10	0,00	79,53	0,00	99,08	99,86	97,78	97,38
	Контраст	4,250E+0	0,000E+0	1,649E+0	0,000E+0	6,366E+0	1,138E+1	4,512E+0	4,228E+0

Дата и время	Параметр	Результаты вычислений							
		Auto	Float	L1&L2	Code	Only L1	Only L2	Narrow Lane (L1+L2)	Wide Lane
25.12.2022, 1-2 ч.	Разность координат dx, dy, dz , м	-35 918,5077 10 865,0074 14 818,0400	-35 918,5063 10 864,9992 14 818,0309	-35 918,5272 10 865,0291 14 818,0619	-35 918,6288 10 864,9265 14 817,8985	-35 918,5157 10 865,0267 14 818,0647	-35 918,5266 10 865,0369 14 818,0690	-35 918,4854 10 864,9839 14 818,0313	-35 918,4854 10 864,9839 14 818,0313
	Расстояние / S_b , м	40 345,5312 / 3,617E-2	40 345,5244 / 3,839E-2	40 345,5625 / 3,563E-2	40 345,5653 / 9,843E-2	40 345,5526 / 3,561E-2	40 345,5666 / 3,566E-2	40 345,5019 / 3,731E-2	40 345,5019 / 3,731E-2
	Нормальная высота, м	225,5902 184,2547	225,5902 184,2450	225,5902 184,2716	225,5902 184,0561	225,5902 184,2783	225,5902 184,2805	225,5902 184,2493	225,5902 184,2493
	S_x, S_y, S_z , м	2,084E-2 2,074E-2 2,106E-2	2,191E-2 2,172E-2 2,284E-2	2,057E-2 2,054E-2 2,060E-2	5,905E-2 4,612E-2 6,383E-2	2,056E-2 2,053E-2 2,059E-2	2,058E-2 2,056E-2 2,063E-2	2,139E-2 2,118E-2 2,205E-2	2,139E-2 2,118E-2 2,205E-2
	Результирующее СКО, м	0,0108	0,0099	0,0128	0,5290	0,0089	0,0134	0,0221	0,0221
	Коэффициент, %	99,95	0,00	99,84	0,00	99,97	99,88	100,00	100,00
	Контраст	1,254E+1	0,000E+0	8,212E+0	0,000E+0	1,468E+1	1,134E+1	3,132E+1	3,132E+1

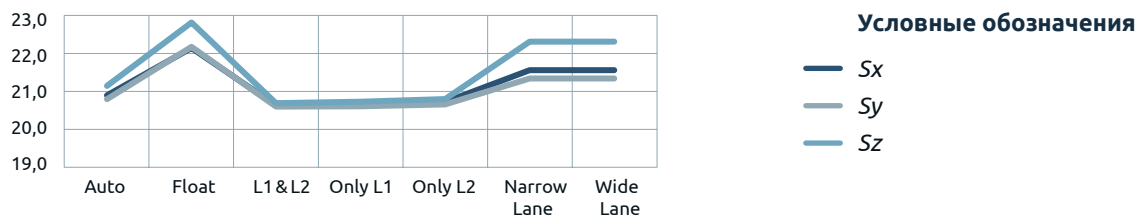
Рис. 1 Графики оценки точности линии Одинцово — Менделеево

Fig. 1 Graphs of the accuracy assessment of the Odintsovo – Mendeleevo line

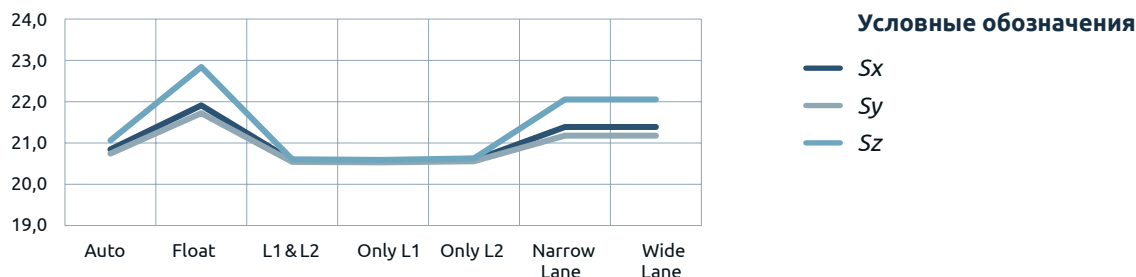
Точность определения вектора (S_x , S_y , S_z) на 23.12.2022, мм



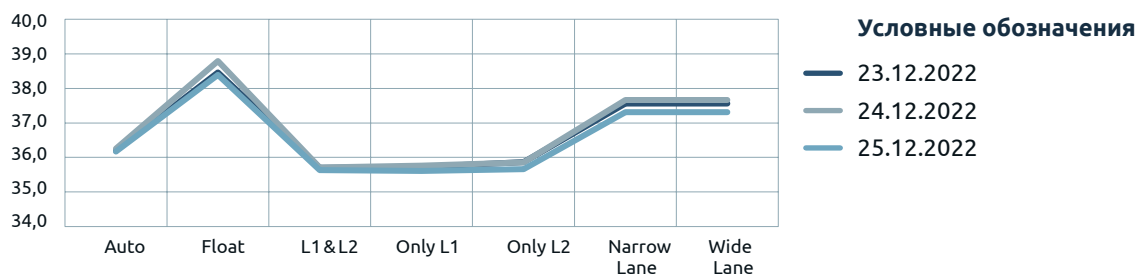
Точность определения вектора (S_x , S_y , S_z) на 24.12.2022, мм



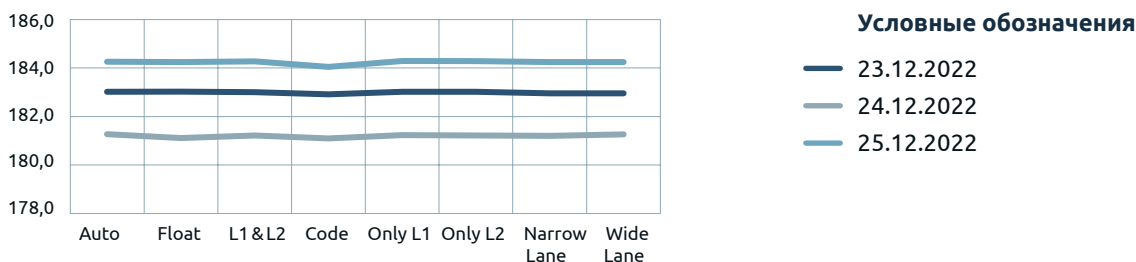
Точность определения вектора (S_x , S_y , S_z) на 25.12.2022, мм



Точность определения расстояния (S) на 23.12.2022, 24.12.2022 и 25.12.2022, мм



Изменение нормальной высоты пункта Менделеево на 23.12.2022, 24.12.2022 и 25.12.2022, м



Разность высот пункта Менделеево (24.12.2022–23.12.2022, 25.12.2022–24.12.2022, 25.12.2022–23.12.2022), м



Условные обозначения

- 24.12.2022–23.12.2022
- 25.12.2022–24.12.2022
- 25.12.2022–23.12.2022

4 Обсуждение

В результате анализа данных (табл. 2, рис. 1) выбраны два оптимальных сценария обработки ГНСС-измерений — Auto и L1 & L2, — которые будут использоваться при обработке трех линий на одночасовом и шестичасовом интервалах. В исходных параметрах «Свойства проекта» точность определения изменена для статики на 2,5 м, для O-файлов — на 2,5 м.

После исключения грубых ошибок измерений по вычисленным невязкам и расширения выборки ГНСС-данных до 6 ч. в ходе вычисления получены результаты, представленные в табл. 3–5. Графики изменения геометрического фактора представлены на рис. 2–4. Характеристика PDOP (англ. Position Dilution of Precision) вычисляется из квадратного корня суммы квадратов характеристик VDOP (англ. Vertical Dilution of Precision) и HDOP (англ. Horizontal Dilution of Precision) [2]. Для того чтобы не перегружать графики геометрического фактора (рис. 2–4), решено было не приводить характеристики GDOP (англ. Geometric Dilution of Precision) и TDOP (англ. Time Dilution of Precision).

Из анализа табл. 3–5 следует, что погрешность изменения длины (приращения координат — S_i) для линий свыше 40 км возрастает и превышает предельную² [3]. На расстояниях 75–78 км (Орехово-Зуево — Менделеево и Клин — Менделеево) погрешность приращения координат (S_i) оказалась свыше 60 мм (от 67 до 70 мм).

Полученные коэффициенты контрастности высокие (табл. 3–5), что говорит о высокой надежности полученного результата.

² Государственная поверочная схема для координатно-временных средств измерений: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 июня 2024 г. № 1374. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/565765> (дата обращения: 17.06.2025).

Значения геометрического фактора невысоки (от 1,4 до 1,9), но нестабильны во времени. Это проявляется «срывами» и «взлетами» от полуночных до полуденных временных интервалов.

Существенные изменения высот происходят на интервале 12–18 ч. (дневное время), что, возможно, свидетельствует о влиянии ионосферного фактора на прохождение ГНСС-сигнала и неточности эфемерид искусственного спутника Земли (в меньшей степени). Увеличение выборки ГНСС-измерений не оказывает значительного влияния на изменение высоты пункта.

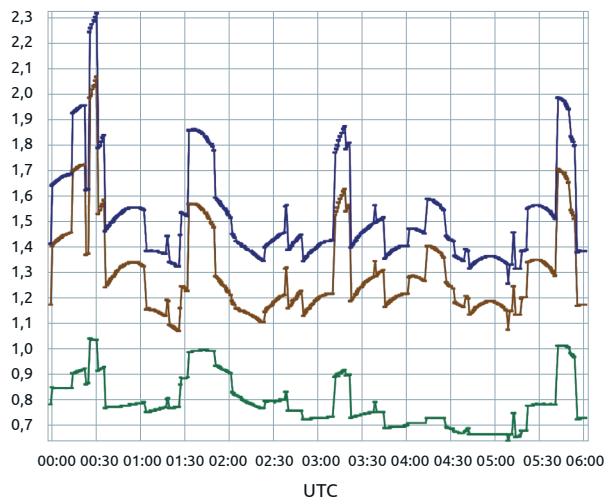
В итоге явно прослеживается тенденция к увеличению погрешности приращения координат с увеличением расстояния (свыше 40 км) и значительному изменению получаемых нормальных высот в дневные сеансы ГНСС-измерений. Следовательно, необходимо подробнее рассмотреть влияние ионосферы на точность высотного положения ГНСС-пунктов. При этом обработку ГНСС-измерений требуется проводить с применением точных эфемерид.

Таблица 3 Ведомость результатов по линии Одинцово — Менделеево

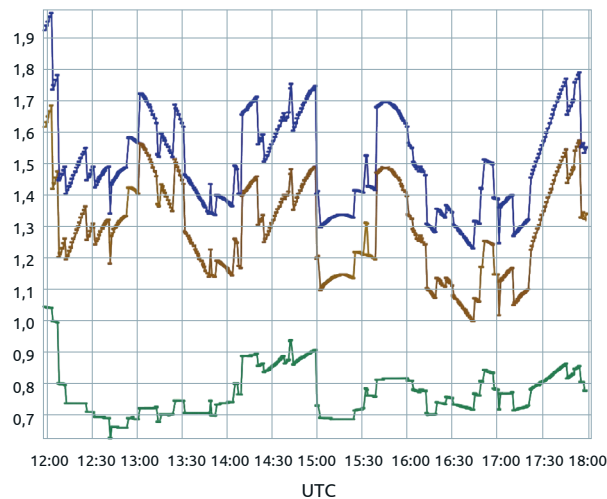
Table 3 Statement of results on the line Odintsovo – Mendeleevo

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
Auto	Разность координат dx, dy, dz , м	–35 918,5083 10 865,0090 14 818,0437	35 918,5002 –10 865,0072 –14 818,0541	–35 918,4911 10 865,0177 14 818,0226	35 918,4872 –10 865,0293 –14 818,0734	–35 918,5077 10 865,0074 14 818,0400	35 918,4930 –10 865,0160 –14 818,0705
	Расстояние / S_i , м	40 345,5335 / 3,620E–2	40 345,5297 / 3,586E–2	40 345,5128 / 3,788E–2	40 345,5312 / 3,606E–2	40 345,5312 / 3,617E–2	40 345,5317 / 3,581E–2
	Нормальная высота, м	224,3417 183,0097	225,6759 184,3563	222,5498 181,2136	223,2167 181,9250	225,5902 184,2547	226,1176 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	2,086E–2 2,076E–2 2,107E–2	2,067E–2 2,062E–2 2,082E–2	2,171E–2 2,137E–2 2,252E–2	2,076E–2 2,070E–2 2,100E–2	2,084E–2 2,074E–2 2,106E–2	2,064E–2 2,060E–2 2,077E–2
	Результ. СКО, м	0,0123	0,0114	0,0185	0,0171	0,0108	0,0101
	Коэффициент, %	99,98	99,83	95,08	99,99	99,95	99,63
	Контраст	1,506E+1	7,598E+0	3,423E+0	2,863E+1	1,254E+1	6,123E+0
L1 & L2	Разность координат dx, dy, dz , м	–35 918,5326 10 865,0275 14 818,0416	35 918,5270 –10 865,0268 –14 818,0569	–35 918,5754 10 865,0354 14 818,0580	35 918,5424 –10 865,0368 –14 818,0655	–35 918,5063 10 864,9992 14 818,0309	35 918,5202 –10 865,0296 –14 818,0664
	Расстояние / S_i , м	40 345,5594 / 3,570E–2	40 345,5599 / 3,561E–2	40 345,6057 / 3,604E–2	40 345,5794 / 3,567E–2	40 345,5244 / 3,839E–2	40 345,5580 / 3,556E–2
	Нормальная высота, м	224,3417 183,0036	225,6788 184,3563	222,5498 181,2116	223,2455 181,9250	225,5902 184,2450	226,1286 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	2,231E–2 2,195E–2 2,236E–2	2,054E–2 2,055E–2 2,058E–2	2,073E–2 2,072E–2 2,097E–2	2,058E–2 2,056E–2 2,065E–2	2,191E–2 2,172E–2 2,284E–2	2,052E–2 2,051E–2 2,056E–2
	Результ. СКО, м	0,0158	0,0189	0,0194	0,0211	0,0128	0,0155
	Коэффициент, %	96,75	99,44	79,53	99,93	99,84	92,85
	Контраст	3,736E+0	5,449E+0	1,649E+0	7,717E+0	8,212E+0	2,686E+0

23.12.2022



24.12.2022



25.12.2022

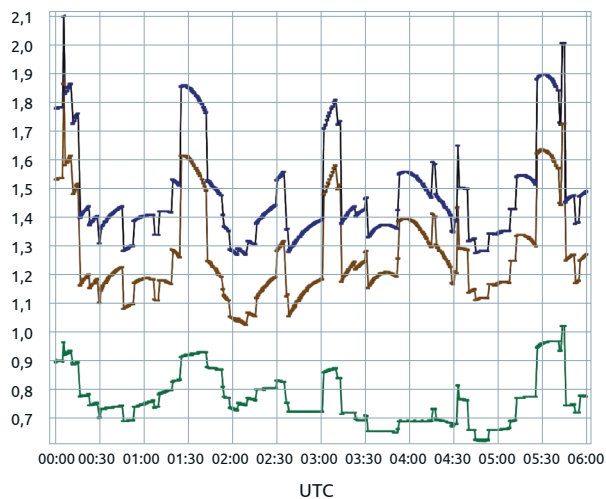


Рис. 2 Графики геометрического фактора линии Одинцово — Менделеево (23, 24 и 25 декабря 2022 г.)

Fig. 2 Geometric factor graphs of the Odintsovo – Mendeleevo line (December 23, 24 and 25, 2022)

Условные обозначения

- PDOP
- HDOP
- VDOP

Таблица 4 Ведомость результатов по линии Орехово-Зуево — Менделеево

Table 4 Statement of results on the line Orekhovo-Zuyevo – Mendeleevo

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
Auto	Разность координат dx, dy, dz , м	38 789,7383 -65 633,8849 7047,1319	38 789,7282 -65 633,8848 7047,1307	38 789,7185 -65 633,9073 7047,0935	-38 789,7221 65 633,8950 -7047,1144	38 789,7259 -65 633,8916 7047,1246	-38 789,7276 65 633,8805 -7047,1302
	Расстояние / S_i , м	76 564,4351 / 6,741E-2	76 564,4297 / 6,718E-2	76 564,4406 / 6,799E-2	76 564,4339 / 6,727E-2	76 564,4339 / 6,739E-2	76 564,4257 / 6,716E-2
	Нормальная высота, м	141,2504 183,0231	142,5925 184,3631	139,5038 181,2325	140,1727 181,9250	142,5085 184,2689	143,0446 184,8166
	$S_x,$	3,889E-2	3,875E-2	3,919E-2	3,879E-2	3,887E-2	3,874E-2
	$S_y,$	3,881E-2	3,872E-2	3,904E-2	3,876E-2	3,881E-2	3,871E-2
	$S_z,$ м	3,906E-2	3,889E-2	3,952E-2	3,896E-2	3,905E-2	3,887E-2
	Результ. СКО, м	0,0098	0,0103	0,0134	0,0111	0,0098	0,0092
	Коэффициент, %	100,00	98,30	99,54	100,00	100,00	98,05
Контраст	3,873E+1	4,436E+0	7,357E+0	2,304E+1	2,068E+1	4,204E+0	

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
L1 & L2	Разность координат dx, dy, dz , м	38 789,7616 –65 633,9214 7047,1145	38 789,7498 –65 633,9341 7047,1148	38 789,3726 –65 633,9805 7047,1049	–38 789,7644 65 633,9543 –7047,1011	38 789,7538 –65 633,9269 7047,1039	–38 789,7530 65 633,9267 –7047,1162
	Расстояние / S_b , м	76 564,4765/ 6,710E–2	76 564,4814/ 6,699E–2	76 564,3292/ 6,764E–2	76 564,5049/ 6,716E–2	76 564,4763/ 6,708E–2	76 564,4769/ 6,696E–2
	Нормальная высота, м	141,2504 183,0066	142,5925 184,3427	139,5038 181,0636	140,1862 181,9250	142,5085 184,2521	143,0615 184,8166
	S_x , S_y , S_z , м	3,874E–2 3,869E–2 3,879E–2	3,866E–2 3,864E–2 3,872E–2	3,894E–2 3,890E–2 3,931E–2	3,874E–2 3,873E–2 3,885E–2	3,874E–2 3,867E–2 3,877E–2	3,865E–2 3,863E–2 3,869E–2
	Результ. СКО, м	0,0156	0,0230	0,0372	0,0328	0,0138	0,0186
	Коэффициент, %	90,59	97,79	99,49	100,00	95,86	98,29
	Контраст	2,567E+0	3,953E+0	6,700E+0	2,237E+1	3,593E+0	4,269E+0

23.12.2022

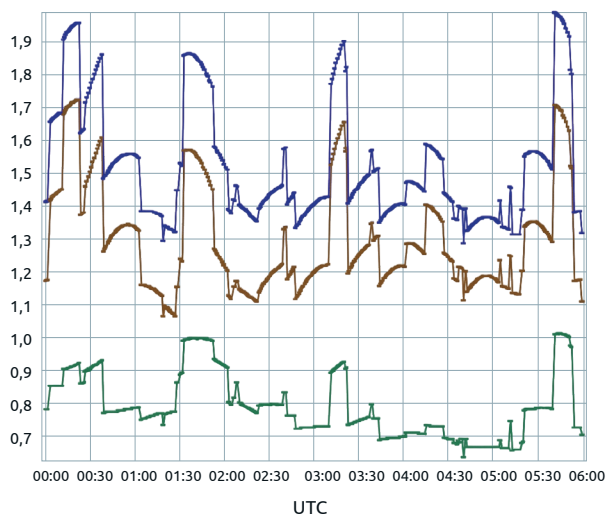


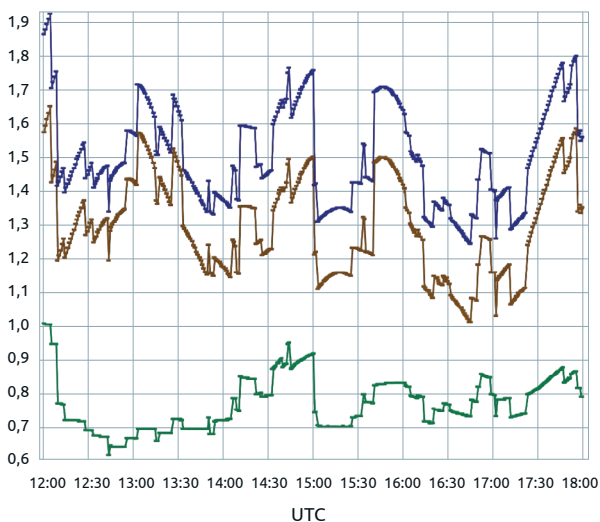
Рис. 3 Графики геометрического фактора линии Орехово-Зуево — Менделеево (23, 24 и 25 декабря 2022 г.)

Fig. 3 Geometric factor graphs of the Orekhovo-Zuyevo – Mendeleevo line (December 23, 24 and 25, 2022)

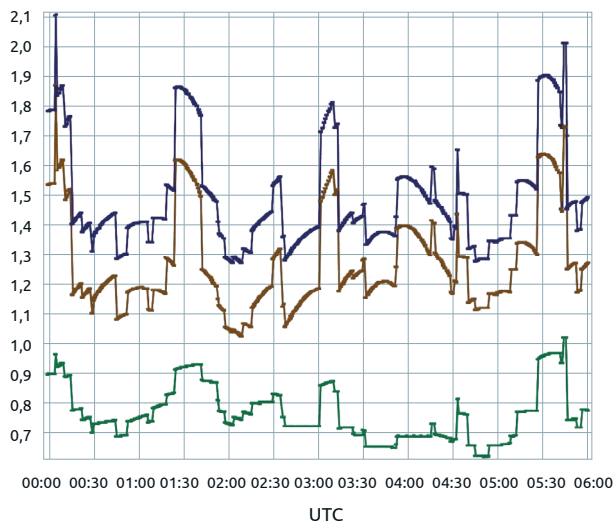
Условные обозначения

- PDOP
- HDOP
- VDOP

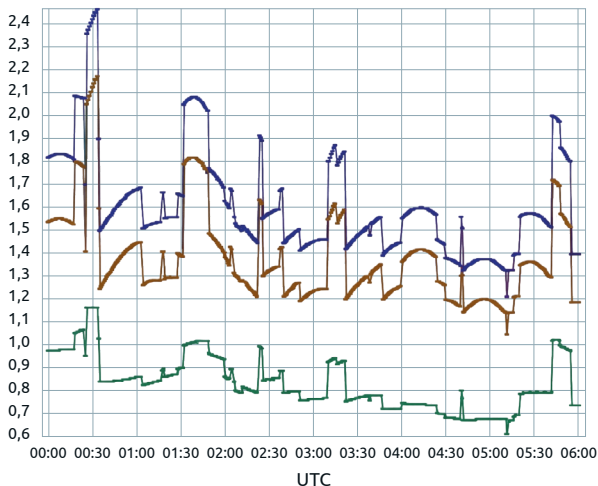
24.12.2022



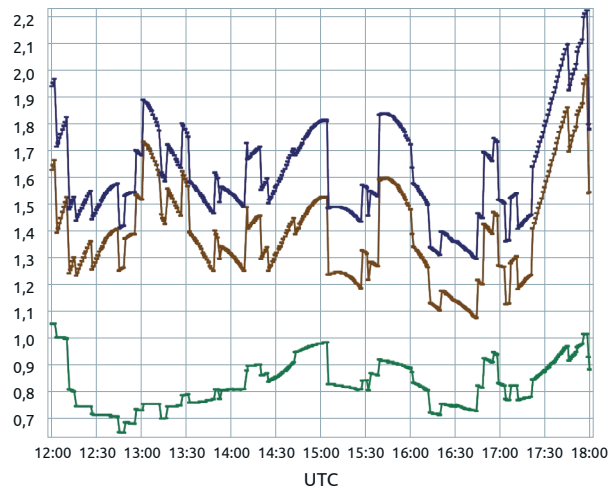
25.12.2022



23.12.2022



24.12.2022



25.12.2022

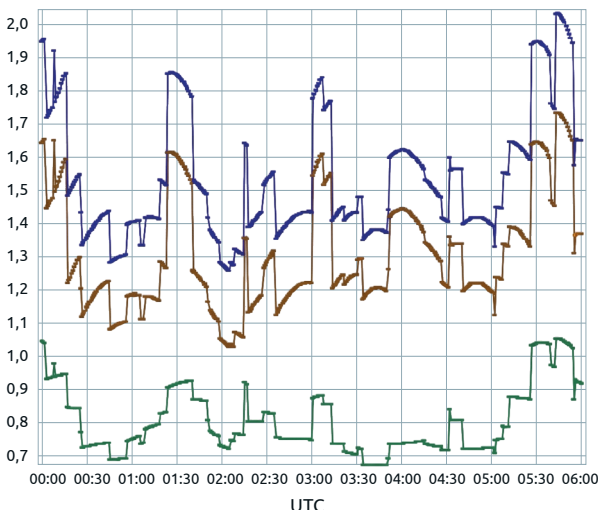


Рис. 4 Графики геометрического фактора линии Клин — Менделеево (23, 24 и 25 декабря 2022 г.)

Fig. 4 Geometric factor graphs of the Klin – Mendeleevo line (December 23, 24 and 25, 2022)

Условные обозначения

- PDOP
- HDOP
- VDOP

Таблица 5 Ведомость результатов по линии Клин — Менделеево

Table 5 Statement of results on the line Klin – Mendeleevo

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
Auto	Разность координат dx, dy, dz , м	-8788,3797	-8788,3945	8788,4074	-8788,3872	-8788,3886	-8788,396
		73 558,0295	73 558,0096	73 558,0082	73 558,0220	73 558,0123	73 558,0075
		-25 211,6305	-25 211,6514	-25 211,6733	-25 211,6373	-25 211,6457	-25 211,6494
	Расстояние / S_b , м	78 253,7260 / $6,927E-2$	78 253,7157 / $6,875E-2$	78 253,7229 / $7,001E-2$	78 253,7220 / $6,903E-2$	78 253,7157 / $6,924E-2$	78 253,7132 / $6,874E-2$
		Нормальная высота, м	194,2614 183,0503	195,6019 184,3551	192,4942 181,2192	193,1511 181,9230	195,5048 184,2700
	S_x , S_y , S_z , м	3,994E-2	3,965E-2	4,033E-2	3,977E-2	3,993E-2	3,964E-2
		3,980E-2	3,960E-2	4,010E-2	3,971E-2	3,979E-2	3,960E-2
		4,023E-2	3,983E-2	4,083E-2	4,008E-2	4,021E-2	3,982E-2
Результ. СКО, м	0,0116	0,0114	0,0130	0,0105	0,0125	0,0112	
Коэффициент, %	97,33	98,23	98,45	99,94	99,78	98,52	
Контраст	4,260E+0	4,461E+0	5,576E+0	9,470E+0	8,607E+0	4,569E+0	

Сценарий	Параметр	Результаты вычислений					
		23.12.2022		24.12.2022		25.12.2022	
		1–2 ч.	0–6 ч.	13–14 ч.	12–18 ч.	1–2 ч.	0–6 ч.
L1 & L2	Разность координат dx, dy, dz , м	-8788,4032 73 558,0595 -25211,6265	-8788,3676 73 558,0679 -25211,6217	-8788,4050 73 558,1062 -25 211,6292	-8788,4013 73 558,0673 -25 211,6725	-8788,4133 73 558,0510 -25211,6642	-8788,4035 73 558,0576 -25211,6608
	Расстояние / S_i , м	78253,7556/ 6,863E-2	78253,7579/ 6,851E-2	78253,8005/ 6,916E-2	78253,7775/ 6,860E-2	78253,7608/ 6,855E-2	78253,7649/ 6,843E-2
	Нормальная высота, м	194,2614 183,0535	195,6019 184,4117	192,4942 181,2904	193,1511 181,9031	195,5048 184,2570	196,0630 184,8219
	S_x , S_y , S_z , м	3,962E-2 3,957E-2 3,968E-2	3,954E-2 3,953E-2 3,960E-2	3,985E-2 3,992E-2 4,003E-2	3,958E-2 3,958E-2 3,967E-2	3,957E-2 3,954E-2 3,962E-2	3,950E-2 3,949E-2 3,954E-2
	Результ. СКО, м	0,0265	0,0274	0,0327	0,0300	0,0177	0,0203
	Коэффициент, %	76,15	96,98	72,26	99,80	95,56	98,74
	Контраст	1,507E+0	3,695E+0	1,328E+0	6,663E+0	3,556E+0	4,622E+0

Для проведения эксперимента взяты ГНСС-данные на протяжении трех суток (23–25 декабря 2022 г.) с интервалом 6 ч. и длительностью 1 ч. по четырем пунктам наблюдений (Менделеево, Одинцово, Орехово-Зуево и Клин). В процессе анализа ГНСС-данных обнаружилась определенная закономерность изменения высотного положения пунктов, поэтому интервал выборки был сокращен. Вычисление и уравнивание выполнено способом Auto (по умолчанию), критерий для статики установлен 2,5 м, для O-файлов — 2,5 м.

При установке параметров обработки оказалось, что данные дневных спутниковых измерений отличаются от ночных своей раздробленностью в течение всего интервала измерения. Результаты представлены в **табл. 6** (отклонение от средней высоты) и одном графике (**рис. 5**).

На **рис. 5** приведена гистограмма отклонения от средней высоты ГНСС-пунктов.

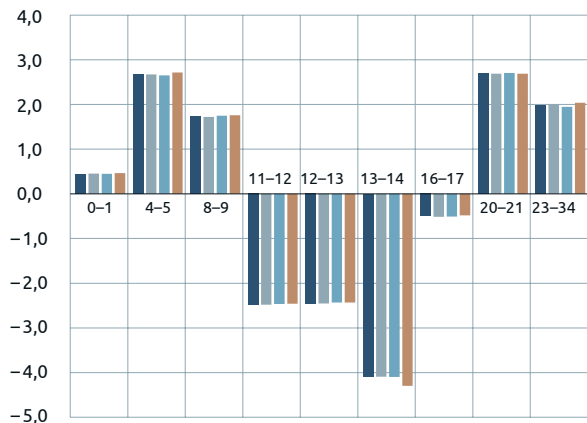
Таблица 6 Отклонение от средней высоты ГНСС-пункта

Table 6 Deviation from the average altitude of the GNSS point

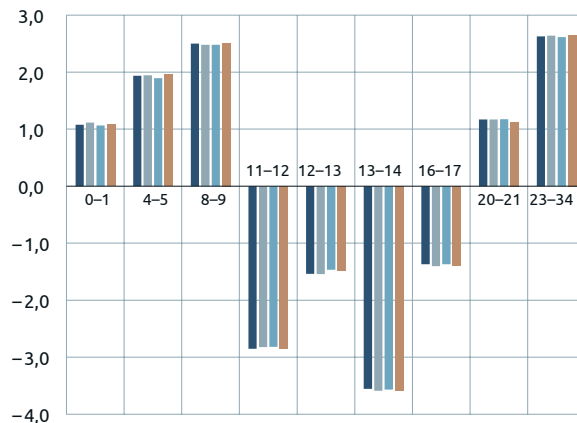
Дата	Отклонение от средней нормальной высоты, м				
	Временной интервал, ч.	Менделеево	Одинцово	Орехово-Зуево	Клин
23.12.2022	0–1	0,4469	0,4525	0,4461	0,4639
	4–5	2,6762	2,6746	2,6509	2,7177
	8–9	1,7341	1,7228	1,7503	1,7587
	11–12	-2,4864	-2,4790	-2,4657	-2,4609
	12–13	-2,4681	-2,4553	-2,4314	-2,4330
	13–14	-4,0944	-4,0931	-4,0969	-4,2952
	16–17	-0,4979	-0,5137	-0,5076	-0,4801
	20–21	2,6985	2,6880	2,7036	2,6921
23–24	1,9913	2,0029	1,9503	2,0372	

Дата	Отклонение от средней нормальной высоты, м				
	Временной интервал, ч.	Менделеево	Одинцово	Орехово-Зуево	Клин
24.12.2022	0–1	1,0784	1,1151	1,0631	1,0787
	4–5	1,9362	1,9473	1,8930	1,9567
	8–9	2,5004	2,4820	2,4782	2,5105
	11–12	-2,8523	-2,8224	-2,8189	-2,8561
	12–13	-1,5377	-1,5398	-1,4675	-1,4745
	13–14	-3,5556	-3,5901	-3,5676	-3,5844
	16–17	-1,3703	-1,4022	-1,3709	-1,4043
	20–21	1,1718	1,1704	1,1746	1,1232
	23–24	2,6287	2,6395	2,6160	2,6505
25.12.2022	0–1	3,4369	3,4579	3,4447	3,4340
	4–5	2,6949	2,6770	2,6403	2,7312
	8–9	0,6016	0,5919	0,6205	0,5978
	11–12	-3,0038	-2,9986	-2,9866	-2,9935
	12–13	-2,9944	-2,9816	-2,9717	-3,0044
	13–14	-5,4025	-5,4191	-5,3976	-5,4215
	16–17	-1,2141	-1,2296	-1,2264	-1,2060
	20–21	2,8558	2,8607	2,8475	2,8290
	23–24	3,0259	3,0413	3,0291	3,0336

23.12.2022



24.12.2022



25.12.2022

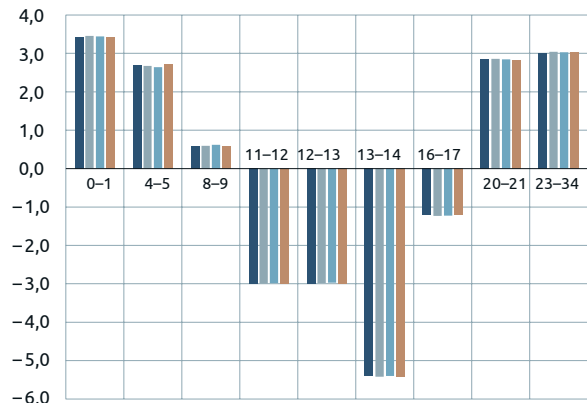


Рис. 5 Гистограммы отклонений от средней нормальной высоты ГНСС-пунктов Менделеево, Одинцово, Орехово-Зуево и Клин по датам наблюдений

Fig. 5 Histograms of deviations from the average normal altitude of GNSS points Mendeleevo, Odintsovo, Orekhovo-Zuyevo and Klin by observation dates

Условные обозначения

- Менделеево
- Одинцово
- Орехово-Зуево
- Клин

Разности высот ГНСС-пунктов в течение одного интервала почти не изменяются. По графикам прослеживается изменение высот ГНСС-пунктов в зависимости от времени суток, что, вероятно, связано с влиянием ионосферы на измерения и неточностью эфемерид искусственного спутника Земли (в меньшей степени).

5 Выводы

В программное обеспечение может быть заложен так называемый пакетный сценарий, состоящий из предобработки, обработки по кодовым измерениям (точность 3–5 м), обработки плавающим и фиксированным сценарием. Предусмотрена возможность изменения типа данных со статического на кинематический и наоборот.

При отбраковке грубых ошибок по полученным невязкам ГНСС-измерений рекомендуется не проводить тщательно эту процедуру, поскольку вместе с грубыми измерениями могут быть исключены точные данные, которые влияют на конечный результат обработки и уравнивания (имеется несовершенство механизма отбраковки в ручном режиме). Следует учесть, что при малом числе измерений оценка решения улучшается, но становится менее надежной. Оптимальный контраст решения (коэффициент надежности) составляет не менее 95 %, отбраковка измерений — не более 10 % [1].

В процессе обработки ГНСС-измерений влияние результирующего геометрического фактора PDOP было незначительным (варьировалось от 1,4 до 1,9). Из статей [4–6] следует, что наиболее выгодные в геометрическом смысле условия наблюдений можно реализовать на широте в 50–60°. Именно в этом интервале широт расположена Москва с ее окрестностями. Следовательно, здесь целесообразно создавать метрологические полигоны для аттестации спутниковой аппаратуры и ее программного обеспечения.

Для расстояний свыше 30 км рекомендуется использовать максимально возможное количество ГНСС-измерений — увеличить временной интервал выборки ГНСС-измерений до четырех часов. Кроме того, следует учесть, что для расстояний больше 40 км возрастают ошибки вычисления длины (табл. 4–5), превышающие предельную, согласно Государственной поверочной схеме [3]. Рекомендуется обработать ГНСС-измерения на одночасовых интервалах с использованием точных эфемерид, устранить грубые ошибки по полученным невязкам, а затем объединить все одночасовые файлы в четырехчасовой.

В процессе анализа высот ГНСС-пунктов выявлено влияние ионосферы на ГНСС-данные измерений и на результаты обработки и уравнивания. Рекомендуется проводить ночные ГНСС-измерения с целью значительного уменьшения влияния на них ионосферы. Для ослабления влияния ионосферного фактора на ГНСС-измерения в программных комплексах рекомендуется выполнить

обработку в режимах Only L1 и Only L2, сравнить полученные результаты, а затем обработать в режиме L1 & L2. Основными ограничениями метода L1 & L2 на этапе определения неоднозначностей является неточность поправки, определяемой с помощью навигационной информации по ионосферной модели.

Рекомендуемые значения ионофактора варьируются в диапазоне от 2 до 4, что соответствует состоянию ионосферы от спокойной до возмущенной. Большее значение данной величины расширяет границы допустимых значений остаточных уклонений [2]. Дальнейшее исследование будет связано с оценкой влияния ионосферы на точность определения высот ГНСС-пунктов с применением математического фильтра Калмана и с учетом исследований [7–10].

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Бойков А.В., Разумовский А.И. JUSTIN — алгоритмы и приемы обработки измерений // Геопрофи. 2011. № 5. С. 30–33.
2. Артемов М.А., Кочкин Д.Е. Особенности использования фазовых измерений систем типа ГЛОНАСС для повышения точности в навигационных задачах // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2010. № 2. С. 19–26.
3. Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Мазуркевич А.В. и др. Изменения в обновленной Государственной поверочной схеме для координатно-временных средств измерений // Альманах современной метрологии. 2019. № 3(19). С. 25–30.
4. Кравчук И.М. Особенности оценки точности результатов фазовых измерений спутниковыми приемниками // Пространственные данные: наука и технологии. 2022. № 13. С. 95–103. DOI:10.30533/scidata-2022-13-07.
5. Шануров Г.А., Остроумов В.З., Остроумов Л.В. О влиянии геометрии спутниковых наблюдений на погрешности определения координат пунктов опорной геодезической сети // Геопрофи. 2008. № 2. С. 57–60.
6. Шануров Г.А., Мельников С.Р., Лопес-Кьерво С. и др. Геометрия спутниковых наблюдений при создании метрологического полигона // Геодезия и картография. 2001. № 7. С. 7–14.
7. Кауфман М.Б., Филонов Д.Н. Определение ионосферных задержек по сигналам GPS по данным измерений одночастотным приемником // Геодезическое образование: сборник материалов Международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. М.: МИИГАиК, 2004. С. 196–200.
8. Карауш Е.А. О проблеме компенсации ионосферной задержки навигационных сигналов в целях проведения калибровки ГНСС-приемников // Альманах современной метрологии. 2021. № 4(28). С. 40–48.

9. Мышерин А.В. Применение фильтра Калмана для оценки полного электронного содержания ионосферы по данным GPS-наблюдений // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2005. № 1-2. С. 141–146.
10. Комаров Р.В., Фахрутдинова А.Н., Нугманов И.С. Методические аспекты оценки точности спутниковых измерений // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Физико-математические науки. 2008. Т. 150, № 3. С. 46–56.

АВТОР

Филонов Дмитрий Николаевич

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево (Московская область), Россия

Поступила 01.07.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликована 29.08.2025.

UDC 528.1

DOI:10.30533/scidata-2025-16-07



Recommendations on the Methodology for Processing GNSS Measurements Based on the Analysis of the Accuracy of the Moscow Geodetic Network

Dmitry N. Filonov¹

AFFILIATIONS

¹ All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radio-Engineering Measurements, Mendeleevo settlement, Moscow region, Russia

filonov_dn@vniiftri.ru

CITATION

Filonov DN. Recommendations on the Methodology for Processing GNSS Measurements Based on the Analysis of the Accuracy of the Moscow Geodetic Network. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 76–97. DOI:10.30533/scidata-2025-16-07.

KEYWORDS

processing of GNSS measurements, GNSS point, network, software, adjustment, analysis, processing scenario, processing parameter, accuracy, coordinate difference, normal height

ABSTRACT

Currently, many software packages for processing GNSS measurements have been developed. The most well-known are Justin, Giodis, Trimble Business Center, various specialized programs for various types of receivers, Bernese, etc. The Justin software is suitable for processing local (partly regional) GNSS networks. The “User’s Guide” for using the software does not cover specific points (features) of the GNSS measurement processing methodology. Moreover, the “User’s Guide” does not always explain specific parameters, values when choosing a specific scenario for processing

GNSS measurements. This article will consider various scenarios (methods) for processing GNSS measurements embedded in the Justin software. Various processing methods will be analyzed to obtain specific results and analyze the accuracy of the calculation. In conclusion, specific recommendations are given for various stages of processing GNSS measurements.

REFERENCES

1. Boykov AV, Razumovsky AI. JUSTIN – algoritmy i priemy obrabotki izmerenii [JUSTIN – Algorithms and Methods for Processing Measurements]. *Geoprofi*. 2011;5: 30–33. (In Russian).
2. Artemov MA, Kochkin DE. Osobennosti ispol'zovaniya fazovykh izmerenii sistem tipa GLONASS dlya povysheniya tochnosti v navigatsionnykh zadachakh [Features of Using Phase Measurements of GLONASS-type Systems to Improve Accuracy in Navigation Tasks]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2010;2: 19–26. (In Russian).
3. Denisenko OV, Silvestrov IS, Mazurkevich AV, et al. Izmeneniya v obnovlennoi Gosudarstvennoi poverochnoi skheme dlya koordinatno-vremennykh sredstv izmerenii [Changes in the Updated State Verification Scheme for Coordinate-Time Measuring Instruments]. *Almanac of Modern Metrology*. 2019;3(19): 25–30. (In Russian).
4. Kravchuk IM. Osobennosti otsenki tochnosti rezul'tatov fazovykh izmerenii sputnikovymi priemnikami [Features of the Accuracy Assessment of the Results of Phase Measurements by Satellite Receivers]. *Spatial Data: Science and Technology*. 2022;13: 95–103. (In Russian). DOI:10.30533/scidata-2022-13-07.
5. Shanurov GA, Ostroumov VZ, Ostroumov LV. O vliyanii geometrii sputnikovyykh nablyudenii na pogreshnosti opredeleniya koordinat punktov opornoj geodezicheskoi seti [On the Influence of the Geometry of Satellite Observations on the Errors in Determining the Coordinates of Points of the Reference Geodetic Network]. *Geoprofi*. 2008;2: 57–60. (In Russian).
6. Shanurov GA, Melnikov SR, Lopez-Quervo S, et al. Geometriya sputnikovyykh nablyudenii pri sozdanii metrologicheskogo poligona [Geometry of Satellite Observations in the Creation of a Metrological Test Site]. *Geodesy and Cartography*. 2001;7: 7–14. (In Russian).
7. Kaufman MB, Filonov DN. Opredelenie ionosfernykh zaderzhok po signalam GPS po dannym izmerenii odnochastotnym priemnikom [Determination of Ionospheric Delays for GPS Signals Based on Measurements by a Single-Frequency Receiver]. *Geodetic Education: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 225th Anniversary of MIIGAiK*. Moscow: MIIGAiK; 2004: 196–200. (In Russian).
8. Karaush EA. O probleme kompensatsii ionosfernoi zaderzhki navigatsionnykh signalov v tselyakh provedeniya kalibrovki GNSS-priemnikov [On the Problem of Compensation for Ionospheric Delay of Navigation Signals for the Purpose of Calibration of GNSS Receivers]. *Almanac of Modern Metrology*. 2021;4(28): 40–48. (In Russian).

9. Mysherin AV. Primenenie fil'tra Kalmana dlya otsenki polnogo elektronnoogo sodержaniya ionosfery po dannym GPS-nablyudenii [Application of the Kalman Filter to Estimate the Total Electron Content of the Ionosphere Based on GPS Observations]. *Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University*. 2005;1-2: 141–146. (In Russian).
10. Komarov RV, Fakhrutdinova AN, Nugmanov IS. Metodicheskie aspekty otsenki tochnosti sputnikovykh izmerenii [Methodological Aspects of Assessing the Accuracy of Satellite Measurements]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya: Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2008;150(3): 46–56. (In Russian).

AUTHOR

Dmitry N. Filonov

All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radio-Engineering Measurements,
Mendeleevo settlement, Moscow region, Russia

Submitted: July 1, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.



Исследование точности двухъярусной аэрофотосъемки с определением координат центров фотографирования при создании топографических планов по материалам беспилотной аэрофотосъемки

Л.В. Быков¹✉, О.Н. Пушак¹, А.А. Морозова²

АФФИЛИАЦИИ

¹ Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Омск, Россия

² «Газстройпром», Санкт-Петербург, Россия

✉ lv.bykov@omgau.org

ЦИТИРОВАНИЕ

Быков Л.В., Пушак О.Н., Морозова А.А. Исследование точности двухъярусной аэрофотосъемки с определением координат центров фотографирования при создании топографических планов по материалам беспилотной аэрофотосъемки // *Пространственные данные: наука и технологии*. 2025. Т. 16, № 2. С. 98–108. DOI:10.30533/scidata-2025-16-11.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

двухъярусная аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, материалы дистанционного зондирования, калибровка

АННОТАЦИЯ

В современных цифровых фотограмметрических системах при обработке данных, как правило, по умолчанию выполняется самокалибровка снимков. Планово-высотная привязка изображений при топографических съемках должна учитывать особенности наземного обеспечения самокалибровки. Колебания высот между опорными точками должны быть

больше, чем возможные превышения определяемых точек. Если это требование не выполняется, необходимо дополнительно определять координаты центров фотографирования. На равнинных территориях с высотной застройкой нужна привязка координат опознаков и центров фотографирования. Это позволяет определить достоверные параметры калибровки, соответствующие всему координатному пространству объекта. В практике кадастровых работ при аэрофотосъемке часто ограничиваются привязкой центров фотографирования. Опознаками на местности в лучшем случае служат базовые станции. При самокалибровке снимков в условиях равнинной местности ошибки в координатах точек не ощущаются. При попытке определить отметки высоких объектов, таких как многоэтажные строения, возникают недопустимые ошибки по высоте. Избежать ошибок в этих условиях привязки можно, выполняя двухъярусную съемку с совместной обработкой снимков. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований особенностей двухъярусных съемок с высот 110 и 90 м. Рассматриваются технологии, применяемые при создании топографических планов, исследуется методика самокалибровки снимков в условиях равнинной местности. Сделаны практические выводы о возможности применения метода двухъярусной аэрофотосъемки для создания ортофотопланов.

1 Введение

В настоящее время при создании крупномасштабных топографических планов используются материалы дистанционного зондирования. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет снизить экономические и временные затраты на производство работ.

Наличие материалов аэрофотосъемки облегчает процесс создания топографического плана. Для получения качественной продукции необходимо, чтобы материалы, полученные с БПЛА, соответствовали требованиям к качеству снимков и точности результатов фотограмметрических построений.

У БПЛА по сравнению с пилотируемыми средствами имеется ряд недостатков: они оснащены не профессиональными, а любительскими камерами. Для получения снимков надлежащего качества необходима съемка с относительно малых высот (порядка 50–200 м). Любительские камеры нуждаются в калибровке, поскольку неизвестны их элементы внутреннего ориентирования и параметры дисторсии, а нелинейные искажения оптики могут достигать нескольких десятков пикселей, что на порядок снижает точность результатов обработки^{1,2} [1–3]. Современное программное обеспечение для фотограмметрической обработки снимков позволяет автоматизировать процесс калибровки фотоаппаратов

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

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

на основе принципа самокалибровки [4–6]. При этом следует обеспечить избыток исходных данных и выполнение определенных геометрических условий. Аэрофотосъемка с определением координат центров фотографирования в сочетании с привязкой избыточного количества наземных опорных точек обеспечивает выполнение всех необходимых требований.

В практике нередко случаи, когда исполнитель, стремясь ускорить процесс съемки и снизить затраты, отказывается от привязки наземных опорных точек или уменьшает их количество до минимума. В итоге после фотограмметрической обработки снимков получают недостоверные параметры самокалибровки и грубые ошибки в результатах построений [7–9].

Цель работы заключается в исследовании точности материалов беспилотной съемки с определением координат центров фотографирования при самокалибровке камеры путем двухъярусной аэрофотосъемки.

2 Материалы и методы

Двухъярусная аэрофотосъемка с определением координат центров фотографирования является одним из способов корректного решения задачи калибровки камеры в процессе фотограмметрических построений при минимуме наземных опорных точек. На небольших по площади объектах затраты на двухъярусную аэрофотосъемку могут оказаться меньше, чем затраты на привязку опорных точек на местности. При работах на линейных объектах в труднодоступных районах двухъярусная аэрофотосъемка может быть единственно возможным способом корректного решения задачи. Таким образом, исследование технологии двухъярусной съемки является актуальным.

Сущность способа самокалибровки состоит в том, что одновременно определяются поправки к приближенным элементам внешнего ориентирования, координатам точек местности, элементам внутреннего ориентирования и суммарные поправки к координатам точек за влияние источников систематических ошибок [10]. Математические условия решения задачи выражаются уравнениями коллинеарности проектирующих лучей в пространстве снимка и местности:

$$1 \left. \begin{aligned} -f \frac{a_1(X_g - X_s) + b_1(Y_g - Y_s) + c_1(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (x - x_0 + \delta_x) &= 0, \\ -f \frac{a_2(X_g - X_s) + b_2(Y_g - Y_s) + c_2(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (y - y_0 + \delta_y) &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где f — фокусное расстояние;

a, b, c — направляющие косинусы — функции угловых элементов внешнего ориентирования снимка a, ω, κ ;

X_g, Y_g, Z_g — координаты точки местности во внешней системе координат;

X_s, Y_s, Z_s — координаты центра проекции во внешней системе координат;

x, y — координаты главной точки в системе координат снимка.

3 Результаты

В рамках исследования была выполнена аэрофотосъемка с БПЛА DJI Phantom 4 Advanced, оснащенного GPS-антенной, что позволило определить координаты центров фотографирования и использовать их в качестве опорных точек. Для определения точности фотограмметрических построений были также заложены и координированы контрольные точки на местности. Маркировка точек выполнена красной краской, что обеспечивает читаемость знаков на фоне подстилающей поверхности. Аэрофотосъемка выполнялась с высот 90 и 110 м. Колебание фактических высот фотографирования не превысило 5 м. Фотограмметрическая обработка снимков выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional (разработчик — группа компаний «Геоскан», Санкт-Петербург). Результатом обработки аэрофотосъемки являются три блока снимков (рис. 1).

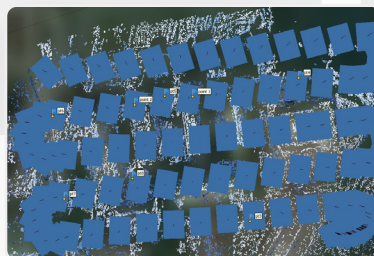
Рис. 1 Блоки, составленные из аэрофотоснимков

Fig. 1 Blocks made up of aerial photographs

Высота 110 м /
110 metres height



Высота 90 м /
90 metres height



Высоты 90 и 110 м /
90 and 110 metres height



4 Обсуждение

Обработка представленных блоков снимков была выполнена в двух вариантах. В первом в качестве опорных точек использовались только координаты центров фотографирования, во втором — координаты одной или двух опорных точек на местности наряду с центрами фотографирования.

При построении фотограмметрических сетей с использованием только координат центров фотографирования средние квадратичные ошибки (СКО), вычисленные по расхождениям координат контрольных точек, при фотографировании с 90 м составили 3 см в плане и 15 см по высоте, с 110 м — 7 см в плане и 12 см по высоте, для блока разномасштабных снимков — 3 см в плане и 4 см по высоте.

При одновременном использовании координат центров фотографирования и опорных точек погрешности уравнивания блоков уменьшились до уровня случайных ошибок определения координат и идентификации опорных точек.

Более полные данные по оценке точности представленных вариантов построения фотограмметрической сети показаны в **табл. 1**.

Таблица 1 Погрешности уравнивания блоков

Table 1 Block alignment errors

Высота, с которой сделаны снимки в блоках, м	Количество опорных точек	СКО координат, м			
		центров фотографирования		контрольных точек	
		в плане	по высоте	в плане	по высоте
90	0	0,05	0,09	0,03	0,15
110	0	0,04	0,05	0,07	0,12
90 и 110	0	0,05	0,02	0,03	0,04
90	1	0,01	0,01	0,03	0,09
110	1	0,01	0,01	0,07	0,07
90 и 110	1	0,01	0,01	0,03	0,04
90	2	0,01	0,01	0,03	0,06
110	2	0,01	0,01	0,07	0,06
90 и 110	2	0,01	0,01	0,02	0,04

Погрешности построения блоков из снимков, снятых с одной высоты, при уравнивании по центрам фотографирования существенно грубее, чем ошибки, полученные при одновременном использовании координат центров и опорных точек. Это говорит о том, что при незначительном колебании высот фотографирования в блоках, полученных с одной высоты фотографирования (около 5 м), результаты самокалибровки снимков недостоверны.

В то же время значения погрешностей оказались существенно меньше ожидаемых ошибок, прогнозируемых на основе ранее выполненных исследований³. Это объясняется тем, что текущий эксперимент проводился в условиях равнинного рельефа и отметки контрольных точек незначительно отклоняются

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

от средней плоскости местности. Даже незначительные колебания высот фотографирования позволяют получить более точные результаты, чем в условиях пересеченной местности. На этом основании было сделано предположение о том, что по контрольным точкам с незначительными взаимными превышениями не удастся выявить реальные деформации модели местности, которые обусловлены недостоверными результатами самокалибровки снимков.

С целью выявления реальных деформаций модели по высоте был проведен следующий эксперимент. Для обеспечения необходимого перепада высот в качестве дополнительных контрольных точек были выбраны точки на крыше здания, отобразившегося на снимках всех блоков. Превышение точек составило около 15 м. Координаты точки определялись фотограмметрическим способом по блоку, обеспеченному координатами центров фотографирования и опорными точками. Обобщенные данные из отчетов представлены в **табл. 2**.

Таблица 2 Результаты уравнивания с использованием контрольных точек на крыше здания
Table 2 Results of adjustment using control points on the roof of the building

Высота, с которой сделаны снимки в блоках, м	Количество опорных точек	СКО координат контрольных точек, м	
		в плане	по высоте
90	0	0,15	0,24
110	0	0,08	0,79
90 и 110	0	0,05	0,02

Использование дополнительных контрольных точек с существенными взаимными превышениями позволяет наиболее точно оценить остаточные деформации геометрической модели местности, обусловленные погрешностями самокалибровки снимков. В блоках, построенных по снимкам, полученным с одной высоты фотографирования, наблюдаются наиболее существенные ошибки по высоте.

Ошибки уравнивания блоков при использовании разномасштабных снимков практически не зависят от количества опорных точек, что подтверждает отсутствие деформаций при построении данного блока снимков во всех вариантах.

5 Выводы

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Применение способа самокалибровки гарантированно дает положительный эффект при использовании координат центров фотографирования и достаточного количества опорных точек на местности.

2. Использование исключительно координат центров в качестве опорных точек не гарантирует получения достоверных параметров самокалибровки снимков.
3. В условиях равнинного рельефа не удастся достоверно оценить величины деформации геометрической модели местности, обусловленные погрешностями самокалибровки снимков.
4. Использование контрольных точек со значительным превышением над земной поверхностью позволяет обнаружить деформации фототриангуляционной сети по высоте в условиях равнинного рельефа.
5. Погрешности, полученные при двухъярусной съемке с применением только координат центров фотографирования, не зависят от количества опорных точек на местности.
6. Полное исключение опорных точек на местности можно обеспечить лишь при двухъярусной съемке с обязательным использованием координат центров фотографирования и контрольных точек.

Согласно проекту госстандарта⁴, для построения локальных сетей, состоящих не более чем из пяти маршрутов, каждый из которых содержит 25 снимков, необходимо использовать координаты центров фотографирования и минимум 5 опорных точек, расположенных по краям блока и в центре, поэтому, несмотря на получившийся результат, рекомендуется применять опорные точки при аэрофотосъемке. Однако, если нельзя заложить опознаки на местности, применение двухъярусной съемки является альтернативой.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Кадничанский С.А., Курков В.М., Курков М.В. и др. Фотограмметрическая калибровка фотокамеры для аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Геопрофи. 2019. № 6. С. 35–40.
2. Чибуничев А.Г., Курков В.М., Говоров А.В. и др. Исследование точности фототриангуляции с использованием различных методов лабораторной и полевой калибровки // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. № 2. С. 42–47.
3. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Курков В.М. и др. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=321> (дата обращения: 10.02.2019).
4. Лазарева Н.С. Калибровка неметрических малоформатных камер и их применение для решения некоторых задач фотограмметрии // Науки о Земле. 2011. № 1. С. 81–92. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience_2011_1-80-91.pdf (дата обращения: 29.05.2025).

⁴ Проект ГОСТ Р-2019. Работы стереофотограмметрические высокоточные. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 26 с.

5. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 2003. 297 с.
6. Лунев А.А. Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2007/ggeo/sagaidak/library/book7.htm> (дата обращения: 29.05.2025).
7. Cramer M., Przybilla H.-J., Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W6. P. 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017.
8. Быков Л.В., Чехлов Д.В. Особенности межевания границ земельных участков по материалам аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития: сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Омск, 26 марта 2020 г. Омск: Омский ГАУ им. П.А. Столыпина, 2020. С. 43–47.
9. Аникеева И.А., Бабашкин Н.М., Кадничанский С.А. и др. О возможности и эффективности использования беспилотных воздушных судов при выполнении кадастровых работ // Геодезия и картография. 2018. Т. 79, № 8. С. 44–52. DOI:10.22389/0016-7126-2018-938-8-44-52.
10. Быков В.Л. Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования // Геодезия и картография. 2007. № 8. С. 39–43.

АВТОРЫ


Быков Леонид Васильевич

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
(Омский ГАУ), Омск, Россия

кафедра геодезии и дистанционного зондирования, землеустроительный факультет
канд. техн. наук, доцент

 0009-0000-5670-5761

Пушак Оксана Николаевна

 on.puschak@omgau.org

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
(Омский ГАУ), Омск, Россия

кафедра геодезии и дистанционного зондирования, землеустроительный факультет

 0000-0002-3139-5397

Морозова Анастасия Александровна

 morozovaanasty@gmail.com

АО «Газстройпром», Санкт-Петербург, Россия

Поступила 11.06.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.

UDC 528.7

DOI:10.30533/scidata-2025-16-11



Research of the Accuracy of Two-Stage Aerial Photographing with Determination of Coordinates of Photography Centers for Creating Topographic Plans from Unmounted Survey Materials

Leonid V. Bykov¹✉, Oksana N. Pushchak¹,
Anastasia A. Morozova²

AFFILIATIONS

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

² Gazstroyprom, Saint Petersburg, Russia

✉ lv.bykov@omgau.org

CITATION

Bykov LV, Pushchak ON, Morozova AA. Research of the Accuracy of Two-Stage Aerial Photographing with Determination of Coordinates of Photography Centers for Creating Topographic Plans from Unmounted Survey Materials. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 98–108. DOI:10.30533/scidata-2025-16-11.

KEYWORDS

two-stage aerial photographing, unmanned aerial vehicle, DZ materials, calibration

ABSTRACT

In modern digital photogrammetric systems, image self-calibration is performed during data processing. This process is typically performed by default. The horizontal and vertical georeferencing of images during topographic surveys must take into account the specifics

of ground-based self-calibration support. Elevation variations between control points must be greater than the possible elevations of the points being determined. If this requirement is not met, additional determination of the coordinates of the photographic centers is necessary. In flat areas with high-rise buildings, georeferencing of the coordinates of landmarks and photographic centers is required. This allows for the determination of reliable calibration parameters corresponding to the entire coordinate space of the object. In the practice of cadastral works, aerial photography is often limited to referencing the centers of photography. At best, a base station serves as a marker on the ground. When self-calibrating images in flat terrain, errors in the coordinates of points are not felt. When trying to determine the marks of high objects, such as multi-story buildings, unacceptable errors in height occur. Errors in these referencing conditions can be avoided by performing a two-tier survey with joint processing of images. The article presents the results of experimental studies of the features of two-tier surveys from heights of 110 and 90 meters. The article discusses the technologies used in creating topographic plans. A study of the self-calibration technique of images in flat terrain is carried out. Practical conclusions are made on the possibility of using the two-tier aerial photography method to create orthophotoplans.

REFERENCES

1. Kadnichanskiy SA, Kurkov VM, Kurkov MV, et al. Fotogrammetricheskaya kalibrovka fotokamery dlya aerofotos"yemki s bespilotnogo vozdušnogo sudna [Photogrammetric Camera Calibration for Aerial Photography from an Unmanned Aircraft]. *Geoprofi*. 2019;6: 35–40. (In Russian).
2. Chibunichev AG, Kurkov VM, Govorov AV, et al. Issledovaniye tochnosti fototriangulyatsii s ispol'zovaniyem razlichnykh metodov laboratornoy i polevoy kalibrovki [Investigation of Accuracy in Phototriangulation Using Different Laboratory Calibrating Methods and Field Calibrating Methods]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2016;2: 42–47. (In Russian).
3. Mikhailov AP, Chibunichev AG, Kurkov VM, et al. *Primenenie tsifrovyykh nemetricheskikh kamer i lazernykh skanerov dlya resheniya zadach fotogrammetrii* [Application of Digital Non-Metric Cameras and Laser Scanners for Solving Photogrammetry Problems]. Available from: <http://www.racurs.ru/?page=321> (Accessed 10 February 2019).
4. Lazareva NS. Kalibrovka nemetricheskikh maloformatnykh kamer i ikh primeneniye dlya resheniya nekotorykh zadach fotogrammetrii [Calibration of the Non-Metric Small Format Cameras for Their Use for the Decision of Some Problems Photogrammetry]. *GeoScience*. 2011;1: 81–92. (In Russian). Available from: https://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience_2011_1-80-91.pdf (Accessed 29 May 2025).
5. Antipov IT. *Matematicheskie osnovy prostranstvennoi analiticheskoi fototriangulyatsii* [Mathematical Foundations of Spatial Analytical Phototriangulation]. Moscow: Kartgeotsentr – Geodezizdat; 2003. 297 p. (In Russian).

6. Lunev AA. *Vybor optimal'nykh parametrov kalibrovki tsifrovoi kamery* [Choosing the Optimal Digital Camera Calibration Parameters]. (In Russian). Available from: <https://masters.donntu.ru/2007/ggeo/sagaidak/library/book7.htm> (Accessed 29 May 2025).
7. Cramer M, Przybilla HJ, Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017;XLII-2/W6: 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017.
8. Bykov LV, Chekhlov DV. Osobennosti mezhevaniya granits zemel'nykh uchastkov po materialam aerofotos"emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata [Features of Land Surveying of Land Areas on Materials of Aerial Photography from UAV]. *Geodesy, Land Management and Cadastre: Problems and Prospects of Development: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Omsk, March 26, 2020*. Omsk: Omsk SAU named after P.A. Stolypin; 2020: 43–47. (In Russian).
9. Anikeyeva IA, Babashkin NM, Kadnichanskiy SA, et al. O vozmozhnosti i effektivnosti ispol'zovaniya bespilotnykh vozdushnykh sudov pri vypolnenii kadastrykh rabot [The Possibility and Effectiveness of Using Drones when Performing Cadastral Works]. *Geodesy and Cartography*. 2018;79(8): 44–52. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2018-938-8-44-52.
10. Bykov VL. Polevaya kalibrovka snimkov s ispol'zovaniem sredstv sputnikovogo pozitsionirovaniya [Field Adjustment of Images Using Satellite]. *Geodesy and Cartography*. 2007;8: 39–43. (In Russian).


AUTHORS

Leonid V. Bykov

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
 Department of Geodesy and Remote Sensing, Faculty of Land Management
 PhD in Engineering, Associate Professor

 0009-0000-5670-5761

Oksana N. Pushchak

 on.puschak@omgau.org

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
 Department of Geodesy and Remote Sensing, Faculty of Land Management

 0000-0002-3139-5397

Anastasia A. Morozova

 morozovaanasty@gmail.com

“Gazstroyprom”, Saint Petersburg, Russia

Submitted: June 11, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.