

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

14 | 01 | 2023

Научное издание
Московского государственного университета
геодезии и картографии (МИИГАиК)

Пространственные данные: наука и технологии

Scientific peer-reviewed journal
"Spatial Data: science, research and technology"

14 | 01 | 2023

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

spacejournal.ru

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

spacejournal.ru

Редакционная коллегия

Редакция

Отдел наукометрии
и издательской
деятельности

Выпускающий редактор:

Завалишина Е.В.

Научный редактор:

Врублевская Е.П.

Технический редактор:

Журавлёва Е.Д.

Компьютерная верстка:

Леднёва С.В.

Дизайн-макет обложки:

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

30.06.2023

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 Равиловна 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 Scientometrics
and Publication

Project Management by:

Ekaterina V. Zavalishina

Edited by:

Ekaterina P. Vrublevskaya

Illustrations by:

Ekaterina D. Zhuravlyova

Layout design by:

Svetlana V. Ledneva

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:

30.06.2023

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)

Nurzhan 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

ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

- Брагина Ю.Б.** **8**
Анализ подходов к обеспечению конфиденциальности пространственных вычислений в недоверенной вычислительной среде
- Пучин В.А., Хлытина В.А.** **18**
Проблема информационной безопасности пространственных данных в контексте понятия персональных данных и возможные пути ее решения
- Гулямова Л.Х.-А.** **30**
Геоинформационное моделирование социального пространства города Ташкента

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

- Новиков С.С., Новикова П.Е.** **49**
Перспективы использования радиолокационных спутников в мониторинговой и кадастровой деятельности

ГЕОДЕЗИЯ

- Клыпин И.А., Алексеева А.А.** **65**
Оценка существенности коррелированности измерений при их математической обработке

Contents

GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY

- Bragina Yu.B.** 8
Analysis of approaches to ensuring confidentiality of spatial computing in the untrusted computing environment
- Puchin V.A., Khlytina V.A.** 18
The problem of information security of spatial data as personal data and possible ways to solve it
- Gulyamova L.X.** 30
Geoinformation modelling of social space of the city of Tashkent

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

- Novikov S.S., Novikova P.E.** 49
Prospects of using radar satellites in monitoring and cadastral activities

GEODESY

- Klypin I.A., Alekseeva A.A.** 65
Estimation of the significance of the correlation of measurements in their mathematical processing



Анализ подходов к обеспечению конфиденциальности пространственных вычислений в недоверенной вычислительной среде

Ю.Б. Брагина¹✉

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

✉ bragina_y@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Брагина Ю.Б. Анализ подходов к обеспечению конфиденциальности пространственных вычислений в недоверенной вычислительной среде // Пространственные данные: наука и технологии. 2023. Т. 14. № 1. С. 8–17. DOI:10.30533/scidata-2023-14-01.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

обеспечение конфиденциальности данных, облачная модель распределенных вычислений, пространственные вычисления

АННОТАЦИЯ

В статье обсуждается общая проблематика обеспечения конфиденциальности данных в облачном окружении и выделяется специфическая проблема обеспечения конфиденциальности пространственных вычислений в такого рода среде, показаны причины этой специфичности и высказана идея возможного решения. Целью проводимого исследования является анализ подходов к обеспечению конфиденциальности пространственных вычислений в недоверенной вычислительной среде. Актуальность исследования обуславливается все более широким распространением различных носимых устройств, таких как умные очки или гарнитуры смешанной реальности, которые могут совмещать в поле зрения пользователя цифровую информацию из компьютерной системы

и из внешней среды, позволяя пользователю взаимодействовать с цифровым миром, сохраняя при этом осведомленность о физической среде. Для восприятия, анализа и интерпретации пространственной информации, поступающей из физической среды, необходимо выполнение пространственных вычислений, причем не только на самом носимом устройстве, но и в облачном окружении. Идея решения для обеспечения конфиденциальности пространственных вычислений в недоверенной вычислительной среде, предложенная автором, основана на шифровании пространственного индекса, построенного в виде R^* -дерева.

1 Введение

Технологические достижения последнего времени революционизируют способы нашего взаимодействия с цифровой информацией. К такого рода технологическим достижениям следует отнести и технологию пространственных вычислений, которая предполагает использование компьютерных алгоритмов для восприятия, анализа и интерпретации пространственной информации, поступающей из физической среды. Источником такой пространственной информации могут быть различные носимые устройства, например умные очки или гарнитуры смешанной реальности. Эти устройства могут совмещать в поле зрения пользователя цифровую информацию из компьютерной системы и из внешней среды, позволяя пользователю взаимодействовать с цифровым миром, сохраняя при этом осведомленность о физической среде. Примеры успешного и эффективного использования такого рода взаимодействия приведены в работах [1–3]. Эти работы описывают использование пространственных вычислений и иммерсивных виртуальных технологий для целей управления современным городским хозяйством.

2 Материалы и методы

При использовании пространственных вычислений возникают важные вопросы, касающиеся конфиденциальности используемых данных и информационной безопасности самих пространственных вычислений. Для выполнения пространственных вычислений может быть использована (и практически всегда используется на практике) такая вычислительная среда, как облачные вычисления.

Согласно¹ облачные вычисления — это «модель, обеспечивающая удобный сетевой доступ по требованию к общим конфигурируемым вычислительным

¹ Special Publication 800-145, The NIST Definition of Cloud Computing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf> (дата обращения: 06.11.2023).

ресурсам (сетям, серверам, хранилищам данных, приложениям и сервисам), который оперативно предоставляется с минимальными усилиями по управлению и взаимодействию с сервис-провайдером». Эта модель распределенных вычислений включает в себя пять основных базовых характеристик, три сервисные модели и четыре модели развертывания. Как отмечено в [4], специфика модели облачных вычислений требует исследования применимости тех методов защиты данных, которые использовались ранее, и, возможно, разработки новых методов в этой области. Особенно это касается методов обеспечения конфиденциальности данных: хранение данных в облаке не может считаться безопасным с точки зрения обеспечения конфиденциальности данных, поскольку нельзя быть полностью уверенным, что хранимые данные не могут быть раскрыты злоумышленником из числа сотрудников облачного сервис-провайдера третьей стороне. Для описания этой ситуации различными исследователями были предложены разные модели недоверенного облачного провайдера. В настоящей работе вычислительная среда облачного провайдера считается недоверенной по сути работы [5]. Это значит, что угроза нарушения конфиденциальности (раскрытия данных третьей стороне) считается актуальной, а угрозы нарушения целостности и доступности — нет.

Компании, заинтересованные в развитии модели облачных вычислений, сформировали Альянс облачной безопасности (англ. — «Cloud Security Alliance», CSA), который организует и проводит исследования в области защиты данных в облаке. В результате этих исследований Альянс выпустил важный и постоянно обновляемый документ, своего рода руководство по безопасности облачных вычислений [6]. Согласно этому документу при использовании моделей облачных вычислений IaaS (англ. — «Infrastructure as a Service»), PaaS (англ. — «Platform as a Service») или SaaS (англ. — «Software as a Service»), инсайдер (например, сотрудник облачного провайдера) может нарушить конфиденциальность хранимых данных. Даже шифрование данных не решает проблему, если ключ (или ключи) шифрования не хранится и не используется только на стороне клиента.

3 Результаты и обсуждение

Такой характер угроз требует внедрения соответствующих мер безопасности, основной из которых является использование различных технологий шифрования данных. Шифрование данных на стороне клиента, таким образом, становится необходимой частью мер защиты данных в облаке.

Однако при реализации этого подхода возникает проблема обработки зашифрованных данных. В частности, поиск в таких зашифрованных данных, хранящихся в облаке, не представляется тривиальной задачей. Для решения этой проблемы в научной литературе описаны различные подходы.

Одним из самых сильных, во всяком случае, с точки зрения безопасности, считается подход к поиску в зашифрованных данных, который основан на использовании забывчивой памяти (в иностранной научной литературе используется термин «Oblivious RAM», или ORAM). Непосредственно концепция забывчивой памяти была предложена в работе [6]. Эта концепция предлагала такое устройство памяти, которое бы позволило считывать и записывать данные в память без сохранения информации о том, в каких областях памяти были произведены эти операции чтения и записи. Реализация концепции должна была основываться на специальных протоколах для чтения и записи. Протокол чтения в качестве входных параметров использует N номер элемента памяти и секретный ключ, а в качестве выходного значения выдает значение этого N элемента памяти. Серверная часть в результате выполнения этого протокола не получает никакого значения. Протокол записи в качестве входного значения получает от пользователя номер элемента памяти N и данные, которые нужно записать в этот элемент. Серверная часть, выполняя протокол, передает ему область забывчивой памяти и получает ее обратно уже измененной. Наличие подобных аппаратно-реализованных протоколов дало бы возможность разработать решение для поискового процесса в зашифрованных данных. Для этого необходимо наличие двух модулей забывчивой памяти на стороне облачного сервис-провайдера. Первый модуль — для хранения зашифрованных данных, а второй — для хранения структуры, которая поддерживала бы операцию поиска, то есть поисковый индекс. Эта структура тоже должна храниться в зашифрованном виде. Процедура поиска будет представлять собой набор обращений клиента к сервис-провайдеру с использованием описанного протокола чтения, а процедура загрузки данных — набор обращений клиента к сервис-провайдеру с использованием описанного протокола записи. Стойкость такого подхода будет определяться стойкостью свойства «забывчивости» используемых модулей. Привлекательность этого решения состоит в том, что оно, будучи реализованным, скрывает от сервис-провайдера практически все, даже доступ к результатам поиска. Однако **решение имеет и существенные недостатки:**

- 1) оно требует соответствующих аппаратных решений на стороне сервис-провайдера;
- 2) недостатком использования забывчивой памяти будет относительно невысокая скорость поиска, что, в свою очередь, приведет к ограничениям на размер хранимых таким образом данных.

Если не принимать во внимание аппаратные решения проблемы поиска в зашифрованных данных на стороне недоверенного провайдера (таких как описанный выше вариант с использованием забывчивой памяти), то **наиболее очевидным решением подобной проблемы, на первый взгляд, может быть следующее:**

- 1) создать локальную копию зашифрованных данных, в которых должен быть произведен поиск;
- 2) расшифровать эту локальную копию данных;
- 3) произвести поиск в расшифрованной локальной копии данных;
- 4) получить результаты поиска.

Однако такое решение вопроса напрямую возможно, только если для проведения поиска достаточно части зашифрованных данных, причем эту часть возможно отделить от остальных зашифрованных данных, не расшифровывая их. Если же речь идет о полной выгрузке всех зашифрованных данных из облака для проведения поиска, то такое решение не представляется логичным и бессмысливает перенос данных в облако.

Решением проблемы поиска в зашифрованных данных могло бы быть использование дополнительных структур данных — поисковых индексов, хранимых на стороне клиента. При использовании такого подхода перед отправкой данных в облако выполняется создание поискового индекса одновременно с шифрованием данных. Затем этот индекс на клиентской стороне используется при отсылке запросов на получение зашифрованных данных из облака. Сам индекс хранится локально на клиентской стороне.

Подобный подход имеет следующие недостатки:

- необходимость хранить локальную копию поискового индекса на всех компьютерах, откуда предполагается получать доступ к данным, хранимым в облаке (следует заметить, что получение доступа к данным в облачном окружении с помощью носимых устройств — смартфонов и планшетов — уже стало ожидаемой функцией), что увеличивает вероятность реализации угрозы утечки этого поискового индекса;
- необходимость дополнительных вычислительных ресурсов на клиентской стороне для выполнения операции поиска в данных.

Таким образом, мы приходим к идее разработки систем, способных хранить поисковый индекс непосредственно в облаке. В этом случае, разумеется, этот индекс должен храниться в зашифрованной форме, причем таким образом, что:

- индекс не должен делать возможным раскрытие облачному сервис-провайдеру информации о хранимых данных;
- индекс должен обеспечивать эффективные в вычислительном смысле методы поиска в зашифрованных данных;
- доступ к использованию поискового индекса должен осуществляться с помощью секретного ключа клиента, недоступного облачному сервис-провайдеру.

Насколько известно автору настоящей статьи, впервые решение для защиты данных, отданных на аутсорсинговое хранение внешнему недоверенному провайдеру, было предложено в работе [7]. Решение состояло в конструировании индекса, основанного на зашифрованных данных, и введении добавочной информации для поддержки запросов к зашифрованным данным. Позднее в работе [8]

была предложена криптографическая схема для сохраняющего линейный порядок шифрования (в работе эта схема названа «order-preserving encryption scheme», OPES). Схема могла быть использована для любых одномерных данных, в которых задан линейный порядок. В работе была доказана вычислительная эффективность предложенной схемы, которая позволила бы реализовать эффективные запросы к данным у сервис-провайдера. Интересная идея в этой области, отличная от прежде изложенных здесь подходов, содержится в работе [9]. В этой работе был представлен подход к сохранению конфиденциальности данных в модели аутсорсингового хранения и обработки данных у облачного провайдера, который позволяет выполнять нечеткие запросы к зашифрованным строкам.

Однако все упомянутые подходы применимы либо к строкам, либо к одномерным данным с заданным порядком, и не могут быть непосредственно использованы для защиты пространственных вычислений.

Выполнение запроса на проверку пространственных отношений между объектами требует большого количества вычислений и при выполнении напрямую может сделать реализацию такого запроса чрезвычайно затратным как с точки зрения времени, так и с точки зрения требующихся вычислительных ресурсов. Поэтому для работы с пространственными данными в соответствующих расширениях современных реляционных баз данных используются специальные модели данных (R, R+, R*-деревья, BSP-деревья, k-мерные деревья, квадрои окто-деревья и т.д.). Следует отметить, что в современных условиях использование реляционных баз данных для выполнения пространственных запросов не всегда является возможным. В работе [10] были исследованы специальные случаи, когда реляционные базы данных неприменимы для обработки пространственно-временных данных, и предложены соответствующие решения. Таким образом, в зависимости от типа пространственных запросов и условий их применения для их эффективного выполнения используются различные модели пространственных данных, и любой подход к поиску в зашифрованных пространственных или пространственно-временных данных должен учитывать эту специфику.

Автор считает, что для сохранения пространственно-временных данных в процессе выполнения пространственных вычислений возможно использовать шифрование пространственного индекса, построенного в виде R*-дерева. Общая схема передачи данных облачному провайдеру согласно предлагаемому подходу показана на **Рисунке 1**.

Рис. 1 Общая схема передачи данных облачному провайдеру для выполнения пространственных вычислений.

Fig. 1 Common scheme for transferring data to a cloud provider to perform spatial computing.



4 Выводы

Проведенный анализ показал, что описанные в научной литературе подходы к обеспечению конфиденциальности в недоверенной среде применимы либо к строкам, либо к данным с заданным порядком, и не могут быть непосредственно использованы для защиты пространственных вычислений. Это связано со спецификой моделей пространственных данных, и любой подход к организации выполнения пространственных запросов к зашифрованным пространственным или пространственно-временным данным должен учитывать эту специфику. Результатом анализа также стало предложение обеспечивать конфиденциальность пространственных вычислений в недоверенной вычислительной среде, шифруя не только сами данные, но и пространственный индекс, построенный в виде R*-дерева. Определение вычислительной эффективности такого подхода требует проведения дополнительных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Вычислительные эксперименты, связанные с проверкой применимости и возможной эффективности этого подхода, проводятся в настоящее время на базе Научного центра «Лаборатория пространственных вычислений и искусственного интеллекта» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Hämmäläinen M. Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city // IET Smart Cities. 2021. No. 3(4). P. 201–210. DOI:10.1049/smc2.12015.
2. Hao H., Wang Y. Smart Curb Digital Twin: Inventorying Curb Environments Using Computer Vision and Street Imagery // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2022. Vol. 7. P. 168–172. DOI:10.1109/JRFID.2022.3225733.
3. He X., Ai Q., Wang J., et al. Situation Awareness of Energy Internet of Thing in Smart City Based on Digital Twin: From Digitization to Informatization // IEEE Internet Things Journal. 2023. Vol. 10. No. 9. P. 7439–7458. DOI:10.1109/JIOT.2022.3203823.
4. Информационная безопасность цифрового пространства / под ред. Е.В. Стельмашонок, И.Н. Васильевой. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2019. 155 с.
5. Damiani E., De Capitani, Vimercati S., et al. Balancing confidentiality and efficiency in untrusted relational DBMSs // Proceedings of the 10th ACM conference on Computer and communications security (CCS '03). 2003. P. 93–102. DOI:10.1145/948109.948124.
6. Goldreich O., Ostrovsky R. Software protection and simulation on oblivious RAMs // Journal of the ACM. 1996. No. 3. P. 431–473.
7. Hacigümüş H., Iyer B., Li C., Mehrotra S. Executing SQL over encrypted data in the database-service-provider model // Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '02). 2002. P. 216–227.
8. Agrawal R., Kiernan J., Srikant R., Xu Y. Order preserving encryption for numeric data // Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '04). 2004. P. 563–574.
9. Huang R.W., Gui X.L., Yu S., Zhuang W. Study of privacy-preserving framework for cloud storage // Computer Science and Information Systems. 2011. Vol. 8(3). P. 801–819.
10. Матерухин А.В. Теоретические основы и методология обработки потоков пространственно-временных данных: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.35. 2018. 173 с.

АВТОР

Брагина Юлия Борисовна

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

 0009-0006-3509-2517

Поступила 22.05.2023. Принята к публикации 23.06.2023. Опубликовано 30.06.2023.

UDC 004.042

DOI:10.30533/scidata-2023-14-01



Analysis of approaches to ensuring confidentiality of spatial computing in the untrusted computing environment

Yulia B. Bragina¹✉

AFFILIATIONS

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

✉ bragina_y@mail.ru

CITATION

Bragina YuB. Analysis of approaches to ensuring confidentiality of spatial computing in the untrusted computing environment. *Spatial Data: science, research and technology*. 2023;14(1): 8–17. DOI:10.30533/scidata-2023-14-01.

KEYWORDS

data confidentiality, cloud model of distributed computing, spatial computing

ABSTRACT

The article discusses a general problem of ensuring data confidentiality in a cloud environment and highlights a specific problem of ensuring the confidentiality of spatial computing in this kind of environment, shows the reasons for this specialty and suggests a possible solution. The purpose of this research is to analyze the approaches for ensuring the confidentiality of spatial computing in the untrusted computing environment. The relevance of the study is determined by the increasingly widespread use of various wearable devices, such as smart glasses or mixed reality headsets, which can combine digital information from the computer system and from the external environment in the user's field of view, allowing him to interact with the digital world while maintaining awareness of the physical world. To perceive, analyze and interpret spatial information coming from the physical environment, it is necessary

to perform spatial computing, not only by a wearable device itself, but also in a cloud environment. The idea of the solution for ensuring the confidentiality of spatial computing in the untrusted computing environment is proposed by the author and is based on encryption of a spatial index constructed in the form of the R*-tree.

REFERENCES

1. Hämäläinen M. Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*. 2021;3(4): 201–210. DOI:10.1049/smc2.12015.
2. Hao H, Wang Y. Smart Curb Digital Twin: Inventorying Curb Environments Using Computer Vision and Street Imagery. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. 2022;7: 168–172. DOI:10.1109/JRFID.2022.3225733.
3. He X, Ai Q, Wang J, et al. Situation Awareness of Energy Internet of Thing in Smart City Based on Digital Twin: From Digitization to Informatization. *IEEE Internet Things Journal*. 2023;10(9): 7439–7458. DOI:10.1109/JIOT.2022.3203823.
4. *Informacionnaja bezopasnost' cifrovogo prostranstva* [Information security of the digital space]. Ed. Stelmashonok EV, Vasilevoj IN. Saint Petersburg: SPbGEU; 2019. 155 p. (In Russian).
5. Damiani E, De Capitani, Vimercati S, et al. Balancing confidentiality and efficiency in untrusted relational DBMSs. *Proceedings of the 10th ACM conference on Computer and communications security (CCS '03)*. 2003; 93–102. DOI:10.1145/948109.948124.
6. Goldreich O, Ostrovsky R. Software protection and simulation on oblivious RAMs. *Journal of the ACM*. 1996;3: 431–473.
7. Hacigümüş H, Iyer B, Li C, Mehrotra S. Executing SQL over encrypted data in the database-service-provider model. *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '02)*. 2002; 216–227.
8. Agrawal R, Kiernan J, Srikant R, Xu Y. Order preserving encryption for numeric data. *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '04)*. 2004; 563–574.
9. Huang RW, Gui XL, Yu S, Zhuang W. Study of privacy-preserving framework for cloud storage. *Computer Science and Information Systems*. 2011;8(3): 801–819.
10. Materuhin AV. *Teoreticheskie osnovy i metodologija obrabotki potokov prostranstvenno-vremennyh dannyh* [Theoretical foundations and methodology for processing spatiotemporal data streams: dissertation]. Dr. of Sci. thesis. Moscow: 2018; 173 p. (In Russian).

AUTHOR

Yulia B. Bragina

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

 0009-0006-3509-2517

Submitted: May 22, 2023. Accepted: June 23, 2023. Published: June 30, 2023.



Проблема информационной безопасности пространственных данных в контексте понятия персональных данных и возможные пути ее решения

В.А. Пучин¹✉, В.А. Хлытина¹

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

✉ putch2016@inbox.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Пучин В.А., Хлытина В.А. Проблема информационной безопасности пространственных данных в контексте понятия персональных данных и возможные пути ее решения // Пространственные данные: наука и технологии. 2023. Т. 14. № 1. С. 18–29. DOI:10.30533/scidata-2023-14-14.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

геомаскирование, геозонирование, API геолокации, обезличивание, агрегация точек, агрегация области, корректировка координат, замена координат, FOAM

АННОТАЦИЯ

Пространственные данные становятся персональными в тех случаях, когда в совокупности с другими данными позволяют однозначно идентифицировать субъект данных. В связи с этим необходимо четко разграничивать, в каких случаях следует считать такие данные персональными и защищать их как персональные, а в каких в этом нет необходимости. Целью исследования являлось определение набора необходимых требований по защите пространственных данных в контексте персональных при разработке систем, связанных с определением местоположения. Для достижения обозначенной цели проведена классификация систем, обрабатывающих пространственные данные, изучены подходы

к защите таких данных и обоснованы эффективные меры по их защите. В качестве способов защиты данных рассмотрены различные методы геомаскирования и обезличивания. В результате исследования обоснованы и рационально распределены методы защиты информации для выделенных классов систем. Выявлен набор необходимых требований по защите пространственных данных при разработке систем, связанных с определением местоположения, а также определены направления для дальнейших исследований в этой области.

1 Введение

В настоящее время многие приложения и сайты используют пространственные данные, определяющие местоположение людей, но защите таких данных не уделяется должного внимания. Как следствие, разделение пространственных и персональных данных сказывается на защите систем, обрабатывающих такие данные, что, в свою очередь, поднимает вопросы безопасности и данных как таковых, и данных каждого конкретного человека. При существовании такой проблемы необходимо четко разграничивать, в каких случаях следует считать такие данные персональными, а в каких нет. Авторы считают, что нужно четко обозначить требования, которые должны быть реализованы в системе, обрабатывающей пространственные данные¹, на этапе ее разработки.

В основу исследования положено утверждение, что пространственные данные становятся персональными в тех случаях, когда в совокупности с другими данными позволяют однозначно идентифицировать субъект данных. И, как следствие, эти данные необходимо защищать, поскольку пренебрежение такими свойствами информации, как конфиденциальность, целостность, доступность, может причинить вред владельцу данных.

Проблема недостаточной защищенности данных весьма актуальна и становится масштабнее в связи с развитием технологий геолокации в целях улучшения клиентоориентированных сервисов. Более того, нечетко сформулированное законодательное понятие «персональные данные» позволяет как компаниям, так и физическим лицам закладывать в него выгодную им информацию, что существенно обостряет проблему защиты персональных данных.

Цель статьи — определить набор необходимых требований по защите пространственных данных при разработке систем, связанных с определением местоположения.

Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

- выявление проблемы безопасности пространственных данных;
- определение рисков для пользователей при утечке таких данных;

¹ Здесь и далее в статье под термином «пространственные данные» подразумеваются пространственные данные, относящиеся к персональным данным.

- проведение классификации систем, обрабатывающих пространственные данные;
- изучение подходов к защите пространственных данных;
- обоснование эффективных мер по защите пространственных данных.

В исследовании авторы сосредоточились на изучении существующих методов защиты пространственных данных и выборе наиболее подходящих для применения в современных реалиях.

2 Материалы и методы

Основными методами исследования являлись:

- метод анализа информации, с использованием которого были рассмотрены способы защиты систем, связанных с определением местоположения людей;
- метод классификации, с использованием которого были выделены классы систем, обрабатывающих пространственные данные пользователей приложений.

Объект исследования — способы защиты систем, связанных с обработкой пространственных данных о местоположении.

На первом этапе исследования были выделены следующие классы систем, обрабатывающих пространственные данные пользователей (**Рис. 1**):

Рис. 1 Классы систем, обрабатывающих пространственные данные пользователей.

Fig. 1 Classes of systems processing users' spatial data.



1. **Системы, передающие пространственные данные пользователей сторонним лицам по необходимости:**

- системы, в которых происходит обмен данными между клиентом и сотрудником компании. В качестве примера таких систем можно назвать системы, где предусмотрена доставка товаров или оказание услуг, например заказ такси. В этом случае данные клиента сообщаются курьеру или водителю такси;
- системы, в которых происходит обмен данными между клиентами компании. Примером подобной системы может быть приложение знакомств, которое определяет ближайших друг к другу пользователей и показывает их персональную информацию.

2. **Системы, обрабатывающие пространственные данные пользователей без их передачи сторонним лицам:**

- системы, связанные с приложениями карт, которые обеспечивают передачу информации между пользовательским устройством и инфраструктурой компании;
- системы, использующие геозонирование² (англ. — «geofencing») — технологию, с помощью которой можно задавать границы, при пересечении которых мобильным устройством происходит определенное событие, например приходит рекламное уведомление от компании, приложение которой установлено на телефоне;
- системы, использующие геолокацию через API (англ. — «Geolocation Application Programming Interface», API), которые позволяют пользователю при его согласии передачу данных о его местоположении приложению. Например, в приложении банка по желанию пользователя могут быть показаны ближайшие к нему банкоматы или отделения банка.

Для определения требований по защите таких систем необходимо вначале рассмотреть методы защиты пространственных данных.

Одним из методов сохранения конфиденциальности персональных данных является их обезличивание. **Методы обезличивания** описаны в приказе Роскомнадзора от 5 сентября 2013 г. № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных»³:

- метод введения идентификаторов. Основан на замене части данных идентификаторами и составлении таблицы соответствия данных и идентификаторов;
- метод изменения состава и семантики. Заключается в обобщении или удалении части данных;

2 Геофенсинг (Geofencing) // Энциклопедия «Касперского». 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/geofencing/> (дата обращения: 31.10.2022).

3 Приказ Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций от 5 сентября 2013 г. № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minjust.consultant.ru/files/7638> (дата обращения: 31.10.2022).

- метод декомпозиции. Реализуется путем разделения таблицы с персональными данными на несколько небольших таблиц и составления таблицы их соответствия;
- метод перемешивания. Основан на перемешивании данных в таблице.

Метод обезличивания эффективен, но недостаточен для использования в качестве единственного метода. В некоторых случаях при получении злоумышленником нескольких обезличенных баз данных у него появляется возможность персонализировать информацию пользователей систем. Следовательно, для обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности информации необходимо использовать несколько способов защиты данных, например геомаскирование.

В работе [1] по ряду критериев проанализированы наиболее известные методы геомаскирования данных, которые авторы данной статьи считают основными методами защиты пространственных данных.

- **Агрегация точек**⁴. Суть метода заключается в том, что точки объединяются в кластеры заданного размера, которые преобразуются в одну точку в пределах кластера, ее размер зависит от количества исходных точек [2].
- **Агрегация области**⁵. Существует несколько вариантов реализации этого метода, но основная идея каждого из них заключается в том, что все точки объединяются по признаку (например, административное деление, ячейка системы координат) в полигоны, далее всем этим точкам присваивается одно значение (например, название района, идентификатор) или эта область закрашивается определенным цветом, который определяется количеством точек в выбранной области.
- **Корректировка координат**⁶. Основной принцип реализации данного метода заключается в смещении всех точек на карте по определенному правилу [3, 4].
- **Замена координат**⁷. Метод реализуется путем кодирования координат по определенному правилу или их замены определенными идентификаторами [5, 6].

На втором этапе исследования обоснованы и распределены рациональным образом методы защиты информации по выделенным ранее классам систем.

Прежде всего следует отметить, что в российском законодательстве закреплён перечень необходимых средств защиты персональных данных. Эти требования

4 Armstrong M.P., Rushton G., Zimmerman D.L. Geographically masking health data to preserve confidentiality // *Statistics in Medicine*. 1999. Vol. 18. No. 5. P. 497–525. DOI:10.1002/(sici)1097-0258(19990315)18:5%3C497::aid-sim45%3E3.0.co;2-#.

5 Там же.

6 Там же.

7 Distance Aware Address Encoding for Privacy-Preserving Record Linkage. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://medium.com/@wilko.henecka/distance-aware-address-encoding-for-privacy-preserving-record-linkage-a6cecdadc22> (дата обращения: 10.11.2022).

не являются специфичными в отношении пространственных данных, поэтому их рассмотрение нецелесообразно.

При выборе способа защиты систем авторы использовали риск-ориентированный подход чтобы, с одной стороны, снизить риски при обработке и хранении пространственных данных компанией — владельцем сервиса, а с другой стороны — не ограничивать возможности сервиса, а также не замедлять его работу.

Во время обмена данными между клиентом приложения и представителем компании целесообразно рассмотреть несколько ситуаций, в которых следует использовать разные средства защиты пространственных данных. Особенностью такого вида систем является наличие человека, который будет доставлять товар к местонахождению клиента. До предоставления услуги, включая время на возможность отказа от нее, **авторы предлагают защищать данные** следующим образом:

- внедрять для входа в систему, имеющую доступ к клиентской базе данных, двухфакторную аутентификацию, а также после предоставления услуги запрещать доступ к данным клиента за исключением номера заказа, поскольку чаще всего лица, осуществляющие доставку услуги клиенту, для доступа к системе с данными клиента используют либо личное устройство, либо устройство, принадлежащее компании;
- в базе данных о клиентах должна храниться информация, обезличенная с помощью метода введения идентификаторов или метода декомпозиции, так как эти методы позволяют в случае необходимости персонализировать данные по таблицам соответствия. Важно отметить, что эти таблицы необходимо хранить отдельно от обезличенной базы данных;
- использование одного из методов геомаскирования — аффинных преобразований — для дополнительной защиты пространственных данных клиента. Суть метода аффинных преобразований⁸ заключается в изменении координат путем смещения или поворота всех точек относительно какой-либо оси или начала координат.

Также большинству компаний необходимо анализировать данные о заказах для улучшения своего сервиса и развития бизнеса. Чтобы компании не обрабатывали персональные данные в ситуациях, когда они могут получить нужную информацию без них, предлагается обезличивать персональные данные клиента методом изменения их состава и семантики. Если компания не может обезличить персональные данные этим методом, рекомендуется использовать такие методы геомаскирования, как агрегация точек или агрегация области.

Для систем, в которых пользователи взаимодействуют между собой, авторы советуют разработчикам приложения по умолчанию отключить публикацию геолокации. В случаях, когда пользователи сами хотят поделиться геолокацией, следует предупреждать их, почему не следует этого делать, и давать им возможность выбрать, насколько полной геолокацией они хотят поделиться.

⁸ Loudon T.V., Andrew K.P. Affine transformations for digitized spatial data in geology // Computers & Geosciences. 1980. Vol. 6. No. 4. P. 397–412.

В приложениях карт пользователи чаще всего авторизуются через свои аккаунты в других системах, поэтому пространственные данные пользователя можно связать с конкретным человеком. Если приложениям карт необходимо анализировать данные о перемещениях пользователей, рекомендуется внедрять в системы метод агрегации точек или области. В ином случае пользовательские данные нужно обезличить путем изменения состава и семантики данных.

Для безопасности данных пользователя приложения, в котором реализовано геозонирование, владельцам не следует обрабатывать и хранить никакие данные, кроме времени и зоны события.

При использовании геолокации через API рекомендуется всегда исключать из запроса все персональные данные клиента, кроме геолокации. В базе данных, куда поступают запросы, следует хранить их количество из каждой области, откуда выполнялся запрос, а также его дату.

3 Результаты

В ходе исследования выделены классы систем, обрабатывающих пространственные данные пользователей:

- 1. Системы, передающие пространственные данные пользователей сторонним лицам по необходимости:**
 - системы, в которых происходит обмен данными между клиентом и сотрудником компании;
 - системы, в которых происходит обмен данными между клиентами компании.
- 2. Системы, обрабатывающие пространственные данные пользователей без их передачи сторонним лицам:**
 - системы, связанные с приложениями карт;
 - системы, использующие геозонирование;
 - системы, использующие геолокацию через API.

Также авторы статьи перечислили основные, по их мнению, методы защиты пространственных данных, а именно следующие виды **геомаскирования**:

- 1) агрегация точек;
- 2) агрегация области;
- 3) корректировка координат;
- 4) замена координат.

Основной результат работы — обоснование и распределение рациональным образом методов защиты информации по выделенным классам систем (**Табл. 1**).

Таблица 1 Методы защиты информации по подклассам систем.

Table 1 Information protection methods by system subclasses.

Подкласс системы	Метод защиты
Обмен данными между клиентом и сотрудником компании	До предоставления услуги:
	двухфакторная аутентификация для сотрудников компании и ограничение их доступа к данным клиента
	обезличивание с помощью метода введения идентификаторов или метода декомпозиции
	геомаскирование методом аффинных преобразований
	После предоставления услуги:
	обезличивание методом изменения состава и семантики
	геомаскирование методом агрегации точек или агрегации области
Обмен данными между клиентами компании	Отключение публикации геолокации по умолчанию, предупреждение пользователей об опасности публикации своего местоположения
Приложения карт	Геомакирование методом агрегации точек или области, обезличивание методом изменения состава и семантики
Геозонирование	Ограничение сбора собираемых и обрабатываемых данных
Геолокация через API	Исключение из запроса всех персональных данных, кроме геолокации

4 Обсуждение

В перспективе планируется также рассмотреть такой способ защиты пространственных данных, как метод геомаскирования под названием «Сетка официальной статистики»⁹. Для официальной статистики в странах Европейского союза используется специальный метод агрегирования координат по районам. Сетка накладывается на данные, а маскируемые координаты заменяются идентификатором, сформированным из координаты нижнего левого угла или координаты центра ячейки, в которую попадают маскируемые координаты. Для реализации данного метода в РФ необходимо адаптировать его к российской системе координат, в связи с чем требуется разработка с нуля алгоритма автоматического агрегирования координат по районам.

⁹ Geographical Grids for Germany: GeoGitter. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/geographische-gitter-fur-deutschland-in-lambert-projektiongeogitter-inspire.html> (дата обращения: 30.11.2022).

Изучение технологии FOAM¹⁰ и ее адаптация с учетом российской специфики — одна из перспектив развития защиты пространственных данных. FOAM — открытый протокол для децентрализованных рынков пространственных данных. Он предназначен для того, чтобы пользователи могли создавать на основе консенсуса карту мира, которой может доверять любое приложение. Составные элементы протокола FOAM предназначены для предоставления пространственных протоколов, стандартов и приложений, которые передают пространственные данные в блокчейны и расширяют возможности карты мира, основанной на консенсусе. FOAM защищает физическое пространство в блокчейне, используя вычислительную мощность Ethereum, и позволяют распределенным пользователям координировать свои действия и взаимодействовать децентрализованно и без разрешения. FOAM — технология, которая находится на стадии разработки, в связи с чем в настоящее время не представляется возможным говорить о ее полноценной работоспособности. Кроме того, она не получила особого распространения нигде, кроме США.

5 Выводы

Разработка сервисов, использующих пространственные данные для предоставления услуг клиентам, — динамично развивающаяся область, которая приобретает все большее значение в жизни современных людей. Технология защиты таких сервисов является важной и перспективной областью исследования, поскольку позволяет сохранять в безопасности данные клиентов и обеспечивать конфиденциальность, целостность и доступность информации.

Авторами обоснован набор необходимых требований по защите пространственных данных в контексте персональных при разработке систем, связанных с определением местоположения. Также были **решены поставленные задачи исследования:**

- выявлена проблема безопасности пространственных данных;
- определены риски для пользователей при утечке таких данных;
- разделены на классы системы, обрабатывающие пространственные данные;
- изучены подходы к защите пространственных данных;
- предложены меры по защите пространственных данных.

Кроме того, авторы отмечают, что помимо технологического стека следует обратить внимание на правовой аспект данного вопроса, например конкретизировать определение термина «персональные данные».

¹⁰ FOAM Whitepaper // Foamspace Corp. 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://foam.space/publicAssets/FOAM_Whitepaper.pdf (дата обращения: 22.11.2022).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Redlich S. Quantitative Analysis of Geomasking Methods. Dr. of Sci. thesis. Essen: 2022. 318 p.
2. Kounadi O., Leitner M. Adaptive Areal Elimination (AAE): A transparent way of disclosing protected spatial datasets // Computers, Environment and Urban Systems. 2016. Vol. 57. P. 59–67. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2016.01.004.
3. Leitner M., Curtis A. Cartographic Guidelines for Geographically Masking the Locations of Confidential Point Data // Cartographic Perspectives. 2004. Vol. 49. No. 7. P. 22–39. DOI:10.14714/CP49.439.
4. Allshouse W.B., Fitch M.K., Hampton K.H., et al. Geomasking sensitive health data and privacy protection: an evaluation using an E911 database // Geocarto International. 2010. Vol. 25. No. 6. P. 443–452. DOI:10.1080%2F10106049.2010.496496.
5. Kroll M., Schnell R. Anonymisation of geographical distance matrices via Lipschitz embedding // International Journal of Health Geographics. 2016. Vol. 15. No. 1. P. 1–14. DOI:10.1186/s12942-015-0031-7.
6. Schnell R., Klingwort J., Farrow J.M. Locational privacy-preserving distance computations with intersecting sets of randomly labeled grid points // International Journal of Health Geographics. 2021. Vol. 20. No. 14. P. 1–16. DOI:10.1186/s12942-021-00268-y.

АВТОРЫ

Пучин Вячеслав Александрович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информационно-измерительных систем,
факультет геоинформатики и информационной безопасности
бакалавр
 0000-0003-0444-9502

Хлытина Влада Андреевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра информационно-измерительных систем, факультет геоинформатики
и информационной безопасности
бакалавр
 vladakh0702@mail.ru
 0000-0002-6096-7104

Поступила 05.06.2023. Принята к публикации 23.06.2023. Опубликовано 30.06.2023.

UDC 004.62

DOI:10.30533/scidata-2023-14-14



The problem of information security of spatial data as personal data and possible ways to solve it

Vyacheslav A. Puchin¹✉, Vlada A. Khlytina¹

AFFILIATIONS

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ putch2016@inbox.ru

CITATION

Puchin VA, Khlytina VA. The problem of information security of spatial data as personal data and possible ways to solve it. *Spatial Data: science, research and technology*. 2023;14(1): 18–29. DOI:10.30533/scidata-2023-14-14.

KEYWORDS

geomasking, geofencing, geolocation API, depersonalization, point aggregation, areal aggregation, adjusting coordinates, coordinate replacement, FOAM

ABSTRACT

Spatial data becomes personal in cases where, in combination with other data, they allow the data subject to be uniquely identified. In this regard, it is necessary to clearly distinguish in which cases such data should be considered personal and protected as personal, and in which this is not necessary. The purpose of the research was to determine a set of necessary requirements for the protection of spatial data in the context of personal data when developing systems related to location determination. To achieve this goal, a classification of systems that process spatial data has been carried out, approaches to protecting such data have been studied, and effective measures to protect them have been justified. Various methods of geomasking and depersonalization are considered as methods of data protection. As a result of the research, information security methods for selected classes of systems are justified and rationally

distributed. A set of necessary requirements for the protection of spatial data when developing systems related to location determination has been identified, and directions for further research in this area have been identified.

REFERENCES

1. Redlich S. Quantitative Analysis of Geomasking Methods. Dr. of Sci. thesis. Essen: 2022. 318 p.
2. Kounadi O, Leitner M. Adaptive Areal Elimination (AAE): A transparent way of disclosing protected spatial datasets. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016;57: 59–67. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2016.01.004.
3. Leitner M, Curtis A. Cartographic Guidelines for Geographically Masking the Locations of Confidential Point Data. *Cartographic Perspectives*. 2004;49(7): 22–39. DOI:10.14714/CP49.439.
4. Allshouse WB., Fitch MK, Hampton KH, et al. Geomasking sensitive health data and privacy protection: an evaluation using an E911 database. *Geocarto International*. 2010;25(6): 443–452. DOI:10.1080/10106049.2010.496496.
5. Kroll M, Schnell R. Anonymisation of geographical distance matrices via Lipschitz embedding. *International Journal of Health Geographics*. 2016;15(1): 1–14. DOI:10.1186/s12942-015-0031-7.
6. Schnell R, Klingwort J, Farrow JM. Locational privacy-preserving distance computations with intersecting sets of randomly labeled grid points. *International Journal of Health Geographics*. 2021;20(14): 1–16. DOI:10.1186/s12942-021-00268-y.

AUTHORS

Vyacheslav A. Puchin

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Information and Measuring Systems, Faculty of Geoinformatics
and Information Security
Bachelor

 0000-0003-0444-9502

Vlada A. Khlytina

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Information and Measuring Systems, Faculty of Geoinformatics
and Information Security
Bachelor

 vladakh0702@mail.ru

 0000-0002-6096-7104

Submitted: June 05, 2023. Accepted: June 23, 2023. Published: June 30, 2023.



Геоинформационное моделирование социального пространства города Ташкента

Л. Х.-А. Гулямова¹✉

АФФИЛИАЦИИ

¹ Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

✉ lola_gulyam@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Гулямова Л.Х.-А. Геоинформационное моделирование социального пространства города Ташкента // Пространственные данные: наука и технологии. 2023. Т. 14. № 1. С. 30–48. DOI:10.30533/scidata-2023-14-06.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

социальное пространство, геоинформационное моделирование, пространственная оценка

АННОТАЦИЯ

Целью исследования является геоинформационное моделирование социального пространства (СП) на примере города Ташкента. В основу положен геопространственный подход, который позволяет провести территориальный анализ, оценку и геоинформационное моделирование СП. Применялись методы регрессионного анализа, теории поля и графов для получения параметров территориальной оценки СП и определения границ зон, характеризующихся сходными условиями. Задачами исследования являются установление ведущих факторов, определяющих свойства СП; разработка картографической модели СП. Исследование проводилось с использованием данных официальной статистики раздела «Открытые данные» на портале Правительства Республики Узбекистан, картографических материалов города Ташкента (в том числе электронных карт), материалов космической съемки, размещенных на портале Google Earth Pro, материалов аутсорсинга OpenStreetMap, данных об аренде жилья, полученных в ходе

социологических исследований, и данных из официальных источников и социальных сетей. В результате проведенной работы установлены закономерности территориального распределения основных факторов, определяющих СП; выявлены характерные черты СП, поддающиеся геоинформационному моделированию; впервые составлена карта оценки СП города Ташкента; представлена трехбалльная шкала, учитывающая основные факторы, определяющие свойства СП: связность отдельных зон СП, транспортная обеспеченность, демографическая составляющая. Полученные результаты могут служить основой совершенствования методов городского планирования для улучшения СП. Выявленные закономерности территориального распределения основных факторов способствуют решению задач повышения качества СП и разработки планов развития городской инфраструктуры.

1 Введение

Проводимые реформы по развитию экономики в Узбекистане основаны на концепции, ориентированной на цифровые и вычислительные технологии для охвата деловой, экономической, социальной, культурной и других видов деятельности. С этим связан интерес к геоинформационному моделированию в социально-экономической картографии [1]. С другой стороны, происходящие процессы дальнейшей урбанизации и связанные с этим изменения в городской среде представляют собой объект исследований для географов, картографов, экономистов и урбанистов. В данной статье рассматриваются некоторые вопросы геоинформационного моделирования социального пространства (СП) столицы Республики Узбекистан.

Ташкент является самым крупным городом в Центральной Азии и отличается высокими темпами роста населения, поэтому геоинформационное моделирование СП нацелено на оценку условий привлекательности для жизни и деятельности населения.

Концепция СП выражает точки соприкосновения физического пространства с социальностью. СП подразумевает особую среду, в которой осуществляются социальные отношения. Как отмечает П. Бурдьё, это многомерное пространство социальных процессов, отношений, практик, позиций и полей, функционально связанных между собой [2].

Эта концепция, по мнению О.И. Вендиной и соавт. [3], представляет методологическое значение в изучении пространственных форм социальных взаимоотношений. В исследованиях социологов указывается недостаточное внимание к представляющим большой научный и практический интерес пространственно-временным параметрам, характеризующим сущность социальной сферы в общественном бытии и выражающим устойчивые способы поведения субъектов [4], крайне редкому применению территориального и картографического

методов [5]. Рост интереса в социологии к пространству в целом, а также к конкретным местам и локальным сообществам связан с необходимостью развития теории социального пространства [6–9].

СП Ташкента в работах социологов, антропологов [10] рассматривается в аспекте развития общественного пространства. Геоинформационному моделированию не было уделено внимания, и данная работа — первая из посвященных этой теме.

Используемый в данном исследовании геопространственный подход направлен на внедрение ряда современных инструментов, способствующих геоинформационному картографированию и пространственному анализу, которые относятся к обнаружению тенденций или закономерностей в данных, относящихся к их пространственным или географическим аспектам [8].

Инструменты пространственного анализа имеют решающее значение для социальной и экономической картографии, поскольку они часто основаны на методах аннотирования данных, таких как географическая привязка или распознавание именованных объектов, и могут привести к визуализации или моделированию в виде карт.

Целью данного исследования является геоинформационное моделирование СП.

Задачи исследования:

- 1) установить ведущие факторы, определяющие качество условий для жизни населения;
- 2) выявить территориальные закономерности распространения этих факторов, оценить с точки зрения привлекательности для проживания и хозяйственной деятельности;
- 3) разработать картографическую модель СП.

Исследования [9] показывают, что ключевым фактором при принятии решения о размещении людьми и фирмами является доступность рабочих мест [10, 11] и удобств¹. Главной в пределах замкнутой системы, которую представляет собой СП, является транспортная инфраструктура² [12]. Улучшение доступности позволяет людям лучше работать в месте, которое соответствует их навыкам, и жить в месте, которое соответствует их потребностям, снижать транспортные расходы, а также способствует экономии агломерации за счет сопоставления, обмена и обучения [13]. Доступность определяет экономическую деятельность и развитие, что часто приводит к скоплению объектов экономической деятельности в экономических центрах [14].

1 Alonso W. Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964. 205 p.

2 Brueckner J.K. The structure of urban equilibria: A unified treatment of the muth-mills model. In: Mills E.S. (ed.) Handbook of Regional and Urban Economics. Edn. 1. Vol. 2. Chap. 20. Elsevier, 1987. P. 821–845.

2 Материалы и методы

2.1 Материалы

Для того, чтобы установить ведущие факторы, определяющие качество условий для жизни населения, были использованы материалы официальной статистики о численности населения города Ташкента и его росте за 2000–2023 годы (Табл. 1, 2)³.

Повышение среднегодовых темпов роста населения вызывает усиление нагрузки на городскую среду, усложнение социальных связей и взаимоотношений, а также изменение социальных полей в СП.

Для анализа территориальных закономерностей распространения факторов, их оценки с точки зрения привлекательности для проживания и хозяйственной деятельности в работе использованы космосъемочные материалы, размещаемые на портале GoogleEarthPro⁴ (Рис. 1), карты Атласа города Ташкента⁵, данные о ставке арендной платы.

Для геоинформационного моделирования использовались открытые данные OpenStreetMap⁶ (Рис. 2), ArcGIS Online⁷.

Таблица 1 Население города Ташкента.

Table 1 Population of Tashkent city.

Год	Количество человек, тыс.
2000	2142,3
2005	2135,7
2010	2234,3
2015	2371,3
2020	2517,7
2022	2574,0
2023	2955,7

Таблица 2 Среднегодовые темпы роста населения города Ташкента.

Table 2 The average annual growth rate of the population of the city of Tashkent.

Период	Темпы роста населения, %
2000–2005	0,996
2005–2010	1,046
2010–2015	1,061
2015–2020	1,062
2019–2020	1,080
2020–2021	1,110
2021–2022	1,140
2022–2023	1,148

3 Агентство статистики при Президенте Республики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.stat.gov.uz> (дата обращения: 30.04.2023).

4 GoogleEarthPro. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earth.google.com/web/search/%D0%A2%D0%B0%D1%88%D0%BA%D0%B5%D0%BD%D1%82/> (дата обращения: 05.04.2023).

5 Атлас Ташкента. Ташкент, 2018. 136 с.

6 OpenStreetMap [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/search?query=tashkent#map=11/41.2931/69.2993> (дата обращения: 08.04.2023).

7 ArcGIS Online. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://arcgis.com> (дата обращения: 10.04.2023).

Рис. 1 Данные Google Earth Pro.

Fig. 1 Google Earth Pro data.

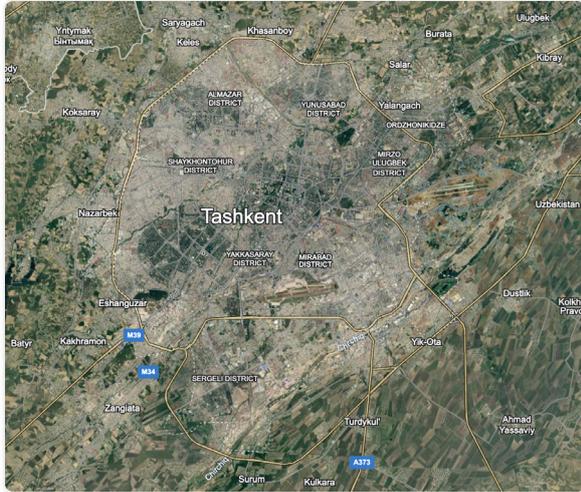
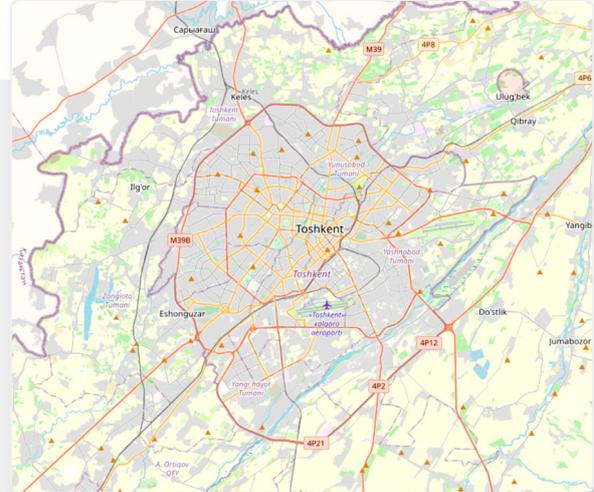


Рис. 2 Открытые данные OpenStreetMap.

Fig. 2 OpenStreetMap open data.



2.2 Методы

Использованные методы опираются на ряд теорий:

- теорию земельной ренты;
- теорию поля;
- теорию графов;
- теорию пространственного анализа [операции геообработки геоинформационных систем (ГИС)].

Согласно теории земельной ренты (или теории предложения ренты) землепользование является результатом платежеспособности различных видов экономической деятельности, таких как розничная торговля, промышленность и проживание. Оптимальным местом, где доступность наиболее высока, обычно является центральный деловой район (ЦДР).

В основе теории земельной ренты лежат три концепции⁸ [15]. Арендная плата образуется как излишек (прибыль) в результате некоторых преимуществ, таких как капитализация и доступность, она является функцией экономической деятельности и основана на платежеспособности.

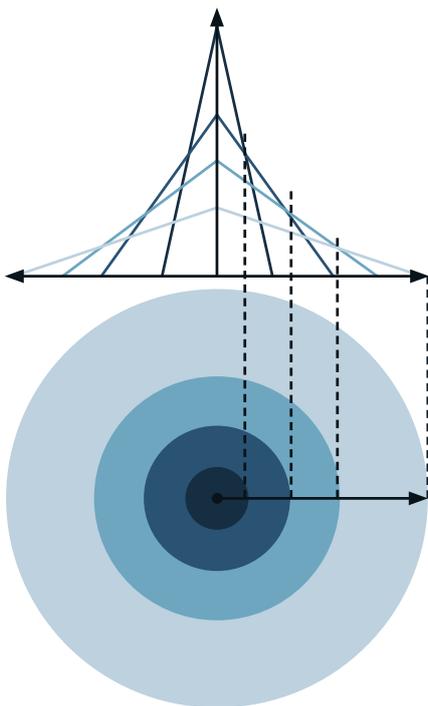
Характерно, что **размер арендной платы изменяется в зависимости от расстояния до ЦДР и вида деятельности.**

1. По мере удаления от точки отсчета, обычно от ЦДР, арендная плата снижается. Градиент снижения связан с тем, как расстояние влияет на его арендную плату. Трение расстояния оказывает сильное влияние на градиент

⁸ Krugman P., Venables A.J. Globalization and the Inequality of Nations // The Quarterly Journal of Economics. 1995. Vol. 110. Iss. 4. P. 857–880.

Рис. 3 График изменения ставки арендной платы в зависимости от расстояния от ЦДР [16].

Fig. 3 Graph of changes in rental rates depending on the distance from the central business district [16].



- арендной платы, потому что без трения все местоположения были бы идеальными.
2. Функция кривой ставки ренты описывает диапазон цен, который домохозяйство (или фирма) готово платить в различных местах, чтобы достичь заданного уровня удовлетворения (полезности/прибыли).
 3. Теоретически путем перекрытия кривых ставок арендной платы для всех видов экономической деятельности в городе создается концентрическая модель землепользования с розничной торговлей в ЦДР, торговлей промышленностью/торговыми объектами на следующем кольце, квартирами дальше, а затем отдельными домами (**Рис. 3**).

Изменение ставки арендной платы варьируется в зависимости от вида хозяйственной и экономической деятельности и от географического положения относительно ЦДР. Согласно этой теории, концентрация розничной торговли наиболее высока в ЦДР, в отличие от индивидуальной застройки, локализованной преимущественно на периферии. Ставка арендной платы промышленных и коммерческих объектов и многоэтажной застройки (**Рис. 4**) также зависит от положения относительно ЦДР.

Рис. 4 Функции кривой ставки арендной платы [16].

Fig. 4 Functions of the rent rate curve [16].

Функция зависимости арендной ставки розничной торговли от расстояния от ЦДР



Функция зависимости арендной ставки индивидуальной застройки от расстояния от ЦДР



Функция зависимости арендной ставки промышленных и коммерческих объектов от расстояния от ЦДР



Функция зависимости арендной ставки многоэтажной застройки от расстояния от ЦДР



На практике городская хозяйственная деятельность представляет собой более сложную схему землепользования. Для оценки СП дополнительно используются методы теории поля и теории графов.

Потенциал поля расселения (ППР), в основе которого лежит теория поля, используется для оценки СП как многомерного пространства социальных процессов и полей, функционально связанных между собой. Таким образом, интерпретация показателей ППР основана на предположении, что чем больше значение ППР, тем больше потенциальных связей.

Аппарат теории графов использован для расчета меры центральности и связности сетей, соединяющих выбранные зоны. В теории графов и сетевом анализе индикаторы центральности присваивают номера или рейтинги узлам в графе, соответствующие их положению в сети. В данном исследовании используются методы расчета меры центральности по Кацу, согласно которым учитывается общее количество маршрутов между парой активных объектов.

Операции геообработки ГИС задействованы для пространственного анализа большого объема данных о факторах, играющих преимущественную роль в оценке СП.

3 Результаты

С целью оценки СП были проанализированы факторы, влияющие на ставку аренды. Априори были выбраны демографические данные: численность населения, площадь района, плотность населения. Эти данные характеризуют особенности размещения населения на территории города (**Табл. 3**). Численность населения изменяется от 54 до 390 тыс. чел., плотность населения — от 1473 до 10 118 чел./км². Это свидетельствует о неравномерном пространственном распределении населения и, соответственно, социальных связей в СП. В дополнение к демографическим данным проанализированы данные о площади жилой застройки, площади под промышленными и транспортными объектами, площади зеленой зоны. Эти показатели также отличаются неравномерностью пространственного распределения. В **Таблице 3** приведены показатели ставки аренды в зависимости от размера квартиры.

Таблица 3 Сведения о районах города Ташкента.

Table 3 Information about the districts of the city of Tashkent.

Район	Население, тыс. чел.	Площадь, га	Плотность населения, чел./км ²	Площадь жилой застройки, га	Площадь под промышленными и транспортными объектами, га	Площадь зеленой зоны, га	Ставка арендной платы, долл./мес., за квартиру с количеством комнат		
							1	2	3
Алмазар	390,0	3378	10118	1061	2190	20	299	341	351
Юнусабад	363,3	4106	7686	1084	2765	90	335	370	400
Шайхонтохур	357,4	27717	11869	1145	1438	8	250	356	419
Мирзо Улугбек	318,0	3617	7259	896	2615	20	304	363	409
Учтепа	289,6	2820	9072	1031	1624	4	270	348	352
Яшнабад	283,3	3715	6266	882	2512	1	318	359	380
Чиланзар	269,5	3043	7338	719	2111	16	310	361	359
Янгихает	156,7	4419	3546				200	300	900
Сергели	154,1	3028	3579	694	3510	23	255	341	335
Мирабад	147,8	1672	7806	447	1185	10	384	443	470
Яккасарой	125,5	1400	8227	348	1008	13	316	406	492
Бектемир	54,0	1871	1473	250	1297	66	150	200	

Примечание. Составлено по материалам о населении городского управления статистики⁹ и данным о ставке арендной платы в социальных сетях.

3.1 Регрессионный анализ

Инструменты регрессионного анализа используются для анализа рядов данных о ставке арендной платы и выявления связей с основными факторами, в качестве которых выбраны плотность населения, площадь, занимаемая отдельными видами экономической деятельности.

Анализ разнообразия городского пространства опирается на данные о стоимости аренды в произвольно выбранных точках. Предполагается, что ставка аренды определяет привлекательность места для проживания и бизнеса, желание платить за доступность и удобства. Территориальное распределение этого показателя позволяет косвенно оценить СП. Для расчета принята ставка арендной платы

⁹ Материалы городского управления статистики на 1 января 2023 г. // Официальный сайт Ташкентского управления статистики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.toshstat.uz/uz/?preview=1&option=com_dropfiles&format=&task=frontfile.download&catid=308&id=3529&Itemid=1000000000000 (дата обращения: 10.04.2023).

однокомнатной квартиры как наиболее востребованной. Востребованность оценена по доле запросов в социальных сетях.

Для проверки предположения, что чем больше площадь жилой застройки, тем больше выбор и, следовательно, ставка арендной платы должна быть взаимосвязана с этим фактором, применен аппарат регрессионного анализа. Результаты приведены в **Таблице 4**.

Таблица 4 Анализ рядов данных о площади застройки и ставке арендной платы жилья.

Table 4 Analysis of data series on the area of development and on the rental rate of housing.

Регрессионная статистика / Regression statistics				
Множественный R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	Стандартная ошибка	Наблюдения
0,184186	0,033925	-0,07342	324,4939	11

Дисперсионный анализ / Analysis of variance					
Параметр	Регрессия	Остаток	Итого	Y-пересечение	Переменная X1
df	1	9	10		
SS	33278,15	947666,8	980944,9		
MS	33278,15	105296,3			
F	0,316043				
Значимость F	0,587721				
Коэффициенты				498,3116	0,963827
Стандартная ошибка				506,88	1,714455
t-статистика				0,983096	0,562177
P-значение				0,351248	0,587721
Нижние 95%				-648,331	-2,91454
Верхние 95%				1644,954	4,842194

Примечание.

1. Множественный R — множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту линейной корреляционной связи между одной случайной величиной и некоторым множеством.
2. R-квадрат (или коэффициент детерминации) — мера, которая позволяет оценить, насколько хорошо модель подходит к данным. Выражается в процентах и может принимать значения от 0 до 100. Чем ближе значение R-квадрата к 100%, тем лучше модель объясняет вариацию данных.
3. Нормированный R-квадрат — скорректированный коэффициент детерминации. Означает, какое влияние корректировка R-квадрата оказала на величину коэффициента детерминации.
4. Стандартная ошибка — оценка того, как значение статистики критерия меняется от выборки к выборке. Это мера неопределенности данного критерия.
5. Наблюдения в 11 районах города Ташкента.
6. df — число степеней свободы.
7. SS — суммы квадратов отклонений.
8. MS — оценки дисперсии между выборками или факторной и внутри них — случайной — случайное отклонение (внутри выборки).
9. F — вычисляемое значение критерия Фишера, значимость F — частное от деления двух дисперсий.
10. Стандартная ошибка — стандартная ошибка коэффициентов.
11. t-статистика — значение t-статистики теста Стьюдента.
12. P-значение — значение p-value для этой статистики.

Регрессионный анализ использован для проверки предположения, что площадь зеленой зоны является существенным фактором в условиях жаркого климата аридной зоны и определяет привлекательность и качество среды. Результаты анализа представлены в **Таблице 5**.

Таблица 5 Анализ рядов данных о зеленой зоне и ставке арендной платы.

Table 5 Analysis of data series on the green zone and the rental rate.

Регрессионная статистика / Regression statistics				
Множественный R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	Стандартная ошибка	Наблюдения
0,260685	0,067957	-0,0356	28,26519	11

Дисперсионный анализ / Analysis of variance					
Параметр	Регрессия	Остаток	Итого	Y-пересечение	Переменная X1
df	1	9	10		
SS	524,2568	7190,289	7714,545		
MS	524,2568	798,921			
F	0,656206				
Значимость F	0,438795				
Коэффициенты				59,72979	-0,12097
Стандартная ошибка				44,15201	0,149338
t-статистика				1,352822	-0,81007
P-значение				0,209117	0,438795
Нижние 95%				-40,149	-0,4588
Верхние 95%				159,6086	0,216853

Примечание.

1. Множественный R — множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту линейной корреляционной связи между одной случайной величиной и некоторым множеством.
2. R-квадрат (или коэффициент детерминации) — мера, которая позволяет оценить, насколько хорошо модель подходит к данным. Выражается в процентах и может принимать значения от 0 до 100. Чем ближе значение R-квадрата к 100%, тем лучше модель объясняет вариацию данных.
3. Нормированный R-квадрат — скорректированный коэффициент детерминации. Означает, какое влияние корректировка R-квадрата оказала на величину коэффициента детерминации.
4. Стандартная ошибка — оценка того, как значение статистики критерия меняется от выборки к выборке. Это мера неопределенности данного критерия.
5. Наблюдения в 11 районах города Ташкента.
6. df — число степеней свободы.
7. SS — суммы квадратов отклонений.
8. MS — оценки дисперсии между выборками или факторной и внутри них — случайной — случайное отклонение (внутри выборки).
9. F — вычисляемое значение критерия Фишера, значимость F — частное от деления двух дисперсий.
10. Стандартная ошибка — стандартная ошибка коэффициентов.
11. t-статистика — значение t-статистики теста Стьюдента.
12. P-значение — значение p-value для этой статистики.

Проведен также анализ рядов данных о численности населения и ставке арендной платы (**Табл. 6**). Результаты анализа показывают, что связь между указанными данными слабая.

Таблица 6 Анализ рядов данных о численности населения и ставке арендной платы.

Table 6 Analysis of data series on the population and on the rental rate for housing.

Регрессионная статистика / Regression statistics				
Множественный R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	Стандартная ошибка	Наблюдения
0,265898	0,070702	-0,03255	2523,627	11

Дисперсионный анализ / Analysis of variance					
Параметр	Регрессия	Остаток	Итого	Y-пересечение	Переменная X1
df	1	9	10		
SS	4360806	57318230	61679036		
MS	4360806	6368692			
F	0,684725				
Значимость F	0,429358				
Коэффициенты				3559,736	13,45538
Стандартная ошибка				4851,025	16,26065
t-статистика				0,733811	0,827481
P-значение				0,481742	0,429358
Нижние 95%				-7414,05	-23,3288
Верхние 95%				14533,52	50,23953

Примечание.

1. Множественный R — множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту линейной корреляционной связи между одной случайной величиной и некоторым множеством.
2. R-квадрат (или коэффициент детерминации) — мера, которая позволяет оценить, насколько хорошо модель подходит к данным. Выражается в процентах и может принимать значения от 0 до 100. Чем ближе значение R-квадрата к 100%, тем лучше модель объясняет вариацию данных.
3. Нормированный R-квадрат — скорректированный коэффициент детерминации. Означает, какое влияние корректировка R-квадрата оказала на величину коэффициента детерминации.
4. Стандартная ошибка — оценка того, как значение статистики критерия меняется от выборки к выборке. Это мера неопределенности данного критерия.
5. Наблюдения в 11 районах города Ташкента.
6. df — число степеней свободы.
7. SS — суммы квадратов отклонений.
8. MS — оценки дисперсии между выборками или факторной и внутри них — случайной — случайное отклонение (внутри выборки).
9. F — вычисляемое значение критерия Фишера, значимость F — частное от деления двух дисперсий.
10. Стандартная ошибка — стандартная ошибка коэффициентов.
11. t-статистика — значение t-статистики теста Стьюдента.
12. P-значение — значение p-value для этой статистики.

3.2 Аппарат теории поля

Следующий этап исследования СП проведен с использованием аппарата теории поля. О.А. Евтеев¹⁰; О.А. Евтеев и С. А. Ковалёв¹¹ для показателя населенности территории применили термин «потенциал поля расселения», характеризующий «особенности тяготения в пределах поля расселения, обусловленные различиями в размещении населения». Этот показатель, как один из расчетных показателей особенностей расселения населения, прямо пропорционален численности жителей в районах и обратно пропорционален расстоянию между ними. Использование его для проведения анализа особенностей расселения населения и потенциального влияния территориальных групп населения подтверждает его качества как наиболее информативного и точного показателя [17]. Картографирование значений потенциала позволяет выявить территориальные зоны влияния, потенциальные возможности связей между ними и косвенно оценить СП с точки зрения привлекательности и удобства. В данном исследовании ППР рассчитан с учетом реальных связей по существующим транспортным путям между 130 произвольно выбранными точками.

3.3 Аппарат теории графов

На городском уровне транспорт оказывает наиболее значительное местное пространственное воздействие. Каждый сегмент города зависит от потребности в мобильности пассажиров (жилье, работа, покупки и отдых) и грузов (потребительские товары, продукты питания, энергия, строительные материалы, вывоз мусора). Демографическая и пространственная эволюция зон города выражается в пространстве шириной и амплитудой перемещений. Центральность по Кацу является обобщением степени центральности, которая измеряет количество непосредственных соседей и измеряет количество всех узлов, которые могут быть соединены через путь, в то время как вклад удаленных узлов наказывается.

Расчет индекса доступности и связности основан на матричном методе, размерность матрицы смежности определяется количеством автомобильных дорог и количеством пересечений, принимаемых за вершины графа. Он был положен в основу характеристики территории по уровню развития отдельных видов транспорта, связности социального пространства. С его помощью выявляются районы, находящиеся при прочих равных условиях в неблагоприятном транспортно-географическом положении при отсутствии удобства сообщения.

10 Евтеев О.А. Карта потенциала поля расселения как особый вид изображения населенности территории // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1969. №2. С. 72–76.

11 Евтеев О.А., Ковалёв С.А. Карты населения // Социально-экономические карты в комплексных региональных атласах. М.: Изд-во Московского университета, 1968. С. 168.

3.4 Карта оценки СП

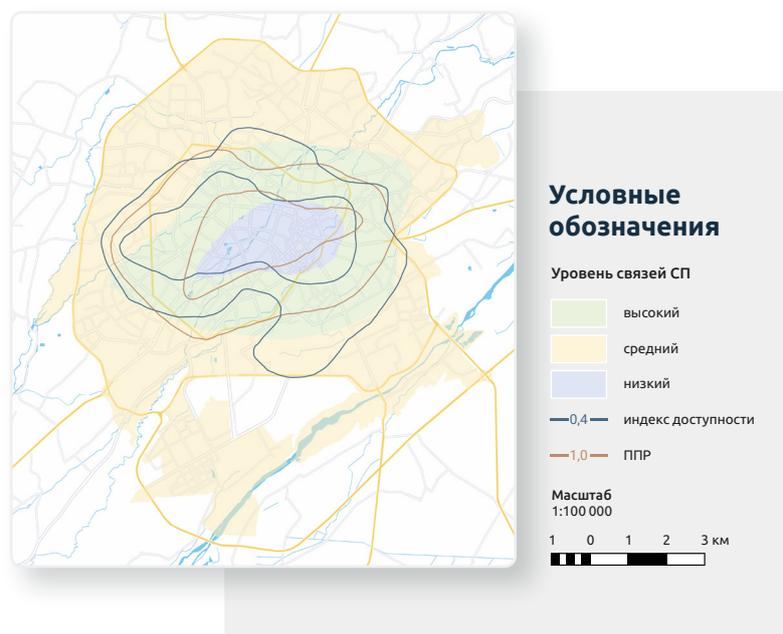
Оценка уровня связей СП выполнена с учетом территориального размещения случайно выбранных мест, для которых определены ставки арендной платы. СП оценивалось на основе рассчитанного индекса транспортной доступности в зависимости от центральности каждого из 130 выбранных мест, значения потенциала поля расселения как параметра функционально связанных между собой пространственных отношений. Применена трехбалльная шкала связей в зависимости от значения индекса доступности и ППР. На основании этого выделены зоны с высоким, средним и низким уровнем связей. Границы каждой из зон уточнялись на основе значений ставки аренды. Минимальные ставки приурочены к зонам с низким уровнем связей на периферии, максимальные же значения — к зонам с высоким уровнем связей.

Конфигурация зон и их размеры характеризуются не только центральным положением районов, радиальным расположением дорог, но и цикличностью сети. Поэтому не все районы, находящиеся на равном удалении от центра, имеют равные условия связности и доступности, и функциональности (**Рис. 5**).

Результаты показывают, что геопространственный подход позволяет разработать методику оценки СП на основе моделирования связности, центральности зон городской среды. Интерпретация показателей индекса транспортной доступности и ППР как параметров территориального распределения социальных связей дополнена данными об аренде, являющейся косвенным индикатором качества городской среды. Данная методика в первом приближении обеспечивает количественными параметрами пространственных отношений в СП.

Рис. 5 Модель СП города Ташкента.

Fig. 5 Model of the social space of the city of Tashkent.



4 Обсуждение

Одним из сложных аспектов исследований СП является определение территориальных границ социальной сферы, в рамках которой потребляются материальные блага и услуги, удовлетворяются потребности человека, проявляются социальные отношения. Наряду с картографированием оценки социальных услуг, когда изучается соответствие предоставляемых услуг установленным нормативам, важно выявить потенциальные возможности пространства для осуществления социальных отношений. В пределах городской среды, являющейся закрытой системой, имеются ограничения, вызванные геометрией пространства. В данном исследовании предпринята попытка определения границ отдельных зон городской среды, характеризующихся равными возможностями для социальных связей благодаря транспортной инфраструктуре. Транспортная сеть является каркасом социальной и экономической деятельности, и ее развитие оказывает непосредственное влияние на качество социальных связей в СП.

Вместе с тем пространственная оценка СП требует дальнейшего совершенствования методов описания социальных связей. Данное исследование дает возможность в первом приближении количественно оценить потенциальные возможности социальных отношений, выявить границы полей взаимодействия. Примененный аппарат теории поля и теории графов способствует объективности выделения границ отдельных зон. Условное ранжирование уровня связей СП подтверждено размером арендной ставки, формирование которой является результатом некоторых преимуществ пространственного размещения и доступности.

5 Выводы

Геоинформационное моделирование СП представляет собой перспективное направление в социально-экономической картографии благодаря возможностям оперирования большими данными о разнообразных социальных связях и взаимоотношениях. Пространственный анализ как инструмент количественной оценки ГИС-данных позволяет интерпретировать эти связи и взаимоотношения, изучать и моделировать их. Совместное использование методов эконометрики и методов моделирования пространства представляет новый подход к получению знаний о СП как о территориальной системе связей, взаимоотношений.

Научное значение разработки методов геоинформационного моделирования заключается в развитии теории СП в социологии, а также геопространственного подхода к сложным социальным процессам, поддающимся формализации с трудом, совершенствовании приемов пространственного анализа.

Практическая ценность данного исследования заключается в том, что полученные результаты могут служить основой совершенствования методов городского планирования для улучшения СП. Выявленные закономерности территориального распределения основных факторов позволяют решению задач повышения качества СП и разработки планов развития городской инфраструктуры, а также объективизации определения границ зон налогообложения.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Гулямова Л.Х.-А., Рахимов Ш. Концепция геопространственных исследований в социально-экономической картографии // Экономика и социум. 2022. № 9(100). С. 864–867.
2. Бурдьё П. Социология социального пространства. М.: Институт экспериментальной социологии; СПб.: Алетейя, 2007. С. 14–49.
3. Вендина О.И., Панин А.Н., Тикунов В.С. Социальное пространство Москвы: особенности и структура // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 6. С. 3–17. DOI:10.31857/S2587-5566201963-17.
4. Хубиев Б.Б., Кушхова А.Ф., Атабиева З.А. Социальная сфера в пространстве и времени: вопросы теории // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2015/2/342.pdf> (дата обращения: 10.04.2023).
5. Шатило Д.П. Социальная дифференциация в «новых» центрах иммиграции (на примере расселения иммигрантов) // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2022;15(3):183–215. DOI:10.31249/kgt/2022.03.11.
6. Писачкин В.А. Теория жизненного пространства в социологии // Регионоведение Regionology. 2016. № 1. С. 7–10.
7. Виноградова Н.Л. Социальное пространство и социальное взаимодействие // Вестник ВГУ. Серия: Гуманитарные науки. 2005. № 2. С. 39–54.
8. Иванов О.И. Социальное пространство как объект научного изучения и управляемой трансформации // Журнал социологии и социальной антропологии. 2013. Т. XVI. № 2(67). С. 49–64.
9. Иванов О.И. Социальное пространство как научное понятие и как объект эмпирического изучения // Научный результат. Сетевой научно-практический журнал. Серия Социальные и гуманитарные исследования. 2015. № 3. С. 29–34. DOI:10.18413/2408-932X-2015-1-3-29-34.
10. Космарский А.А., Чернец Е.А. «Ташкент любит тебя!»: общественные пространства, проблемы развития городской среды // Фольклор и антропология города. 2019. II(3–4). С. 199–207. DOI:10.22394/26583895-2019-2-3-4-199-207.
11. de Graaff T., Debrezion Andom G., Rietveld P. The impact of accessibility on house prices: an application to large urban planning and infrastructure projects in the Netherlands // Geurs K.T., Krizek K.J., Reggiani A. (eds.). Accessibility Analysis and Transport Planning. Challenges for Europe and North America. (NECTAR Series on Transportation and Communications Networks Research). Edward Elgar, 2012. P. 154–173.

12. Glaeser E. Triumph of the city: How our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier. New York: Penguin Books, 2013. 368 p.
13. Teulings C.N., Osokina I.V., de Groot Henri L.F. Land use, worker heterogeneity and welfare benefits of public goods // Journal of Urban Economics. 2018. Vol. 103. P. 67–82. DOI:10.1016/j.jue.2017.10.004.
14. Hoogendoorn S., van Gemeren J., Verstraten P., Folmer K. House prices and accessibility: Evidence from a natural experiment in transport infrastructure. CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis. 2016. 28 p.
15. Puga D. The Magnitude and Causes of Agglomeration Economies // Journal of Regional Sciences. 2010. Vol. 50. No. 1. P. 203–219. DOI:10.1111/j.1467-9787.2009.00657.x.
16. Pászto V. Economic Geography // Pászto V.C., Jürgens P.T., Burian J. (eds.) Spationomy. Springer, Cham. 2020. P. 173–195.
17. Тесленок К.С., Создаев А.А., Манухов В.Ф. Геоинформационное картографирование потенциала поля расселения населения Республики Мордовия // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. Т. 5(15). Вып. 3. С. 223–230.

АВТОР

Гулямова Лола Хаджи-Акбаровна

Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,
Ташкент, Узбекистан
кафедра маркшейдерского дела и геодезии,
геологоразведочный и горно-металлургический факультет
канд. геогр. наук, профессор
 0000-0001-7480-8158

Поступила 29.05.2023. Принята к публикации 23.06.2023. Опубликовано 30.06.2023.

UDC 303

DOI:10.30533/scidata-2023-14-06



Geoinformation modelling of social space of the city of Tashkent

Lola X. Gulyamova¹✉

AFFILIATIONS

¹ Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

✉ lola_gulyam@mail.ru

CITATION

Gulyamova LX. Geoinformation modelling of social space of the city of Tashkent. *Spatial Data: science, research and technology*. 2023;14(1): 30–48. DOI:10.30533/scidata-2023-14-06.

KEYWORDS

social space, geoinformation modelling, spatial assessment

ABSTRACT

The article deals with methodological issues of geoinformation modeling of social space (SS) on the example of the city of Tashkent. The purpose of the study is based on a geospatial approach that allows spatial analysis, assessment and geoinformation modeling of the SS. Research objectives include: 1. Establish the leading factors that determine the properties of the SS. 2. Develop a cartographic model of SS. The paper used materials for the study: 1. Data from official statistics of the "Open Data" section on the portal of the Government of the Republic of Uzbekistan. 2. Cartographic materials of the city of Tashkent (including electronic maps). 3. Remote sensing materials posted on the Google Earth Pro portal. 4. Materials of outsourcing OpenStreetMap. 5. Housing rental data obtained from sociological surveys and data from official sources and social networks. The methods of regression analysis, field theory and graphs were used to obtain the following parameters of the SS score. Results of the study: 1. The regularities of the territorial distribution of the main factors determining the SS were examined. 2. The characteristic features of the SS that are amenable to geoinformation modeling have been identified. 3. For the first time, a map for assessing the joint venture of the city

of Tashkent has been compiled. 4. A 3-point scale has been adopted, taking into account the main factors: 1. Connectivity of individual zones of the joint venture. 2. Transport security. 3. Demographic component. The results obtained can serve as a basis for improving urban planning methods to improve SS. The identified patterns of territorial distribution of the main factors make it possible to solve the problems of improving the quality of SS and developing plans for the development of urban infrastructure.

REFERENCES

1. Gulyamova L, Rakhimov Sh. Kontsepsiya geoprostranstvennykh issledovaniy v sotsial'no-ekonomicheskoi kartografii [The concept of geospatial research in socio-economic cartography]. *Ekonomika i sotsium*. 2022;9(100): 864–867. (In Russian).
2. Burdie P. *Sotsiologiya sotsial'nogo prostranstva* [Sociology of social space]. Moscow: Institut eksperimental'noi sotsiologii; Saint Petersburg: Aleteiya, 2007. P. 14–49. (In Russian).
3. Vendina OI, Panin AN, Tikunov VS. Sotsial'noe prostranstvo Moskvy: osobennosti i struktura [Social Space of Moscow: Peculiarities and Patterns]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2019;6: 3–17. (In Russian). DOI:10.31857/S2587-5566201963-17.
4. Hubiev BB, Kushkhova AF, Atabieva ZA Sotsial'naya sfera v prostranstve i vremeni: voprosy teorii [The social sphere in space and time: theory questions]. *Sovremennye problemi nauki i obrazovaniia*. 2015;2-1. (In Russian). Available from: <https://s.science-education.ru/pdf/2015/2/342.pdf> (accessed: 10.04.2023).
5. Shatilo DP. Sotsial'naia differentsiatsiia v "novykh" tsentrakh immigratsii (na primere rasseleniia immigrantov). [Social differentiation in the "new" immigration centers (on the immigrants settlement pattern example)]. *Outlines of global transformations: politics, economics, law*. 2022;15(3): 183–215. (In Russian). DOI:10.31249/kgt/2022.03.11.
6. Pisachkin VA. Teoriya zhiznennogo prostranstva v sotsiologii [The theory of living space in sociology]. *Regionologiya Regionology*. 2016;1: 7–10. (In Russian).
7. Vinogradova NL. Sotsial'noe prostranstvo i sotsial'noe vzaimodeistvie [Social space and social interaction]. *Vestnik VGU. Seriya: Gumanitarnye nauki*. 2005;2: 39–54. (In Russian).
8. Ivanov OI. Sotsial'noe prostranstvo kak ob"ekt nauchnogo izucheniya i upravlyaemoi transformatsii [Social space as an object of scientific study and controlled transformation]. *Zhurnal sotsiologii i sotsial'noi antropologii*. 2013;2: 49–64. (In Russian).
9. Ivanov OI. Sotsial'noe prostranstvo kak nauchnoe ponyatie i kak ob"ekt empiricheskogo izucheniya [Social space as a scientific concept and as an object of empirical study]. *Research Result*. 2015;3: 29–34. (In Russian). DOI:10.18413/2408-932X-2015-1-3-29-34
10. Kosmarskii AA, Chernets EA. "Tashkent lyubit tebya!": obshchestvennye prostranstva, problemy razvitiya gorodskoi sredy ["Tashkent loves you!": public spaces, problems of urban environment development]. *Fol'klor i antropologiya goroda*. 2019;II(3-4): 199–207. (In Russian). DOI:10.22394/26583895-2019-2-3-4-199-207.

11. de Graaff T, Debrezion Andom G, Rietveld P. The impact of accessibility on house prices: an application to large urban planning and infrastructure projects in the Netherlands. In: Geurs KT, Krizek KJ, Reggiani A (eds.) *Accessibility Analysis and Transport Planning. Challenges for Europe and North America*. (NECTAR Series on Transportation and Communications Networks Research). Edward Elgar; 2012. P. 154–173.
12. Glaeser E. *Triumph of the city: How our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier*. New York: Penguin Books; 2013. 368 p.
13. Teulings CN, Osokina IV, de Groot Henri LF. Land use, worker heterogeneity and welfare benefits of public goods. *Journal of Urban Economics*. 2018;103: 67–82. DOI:10.1016/j.jue.2017.10.004.
14. Hoogendoorn S, Gemeren J van, Verstraten P and Folmer K. *House prices and accessibility: Evidence from a natural experiment in transport infrastructure*. CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis. 2016; 28 p.
15. Puga D. The Magnitude and Causes of Agglomeration Economies. *Journal of Regional Sciences*. 2010; 50(1):203–219. DOI:10.1111/j.1467-9787.2009.00657.x.
16. Pászto V. Economic Geography. In: Pászto VC, Jürgens PT, Burian J (eds.) *Spatiality*. Springer, Cham. 2020. P. 173–195.
17. Teslenok KS, Sozdaev AA, Manuhov VF. Geoinformatsionnoe kartografirovanie potentsiala polya rasseleniya naseleniya Respubliki Mordoviya [Geoinformation mapping of the potential of the population settlement field of the Republic of Mordovia]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*. 2019;5(15)(3): 223–230. (In Russian).

AUTHOR

Lola X. Gulyamova

Tashkent state technical university named after Islam Karimov

Mining Survey and Geodesy, Geological exploration and mining-metallurgical

PhD (Geography), Professor

 0000-0001-7480-8158

Submitted: May 29, 2023. Accepted: June 23, 2023. Published: June 30, 2023.



Перспективы использования радиолокационных спутников в мониторинговой и кадастровой деятельности

С.С. Новиков¹✉, П.Е. Новикова¹

АФФИЛИАЦИИ

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Москва, Россия

✉ s.novikov92@inbox.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Новиков С.С., Новикова П.Е. Перспективы использования радиолокационных спутников в мониторинговой и кадастровой деятельности // Пространственные данные: наука и технологии. 2023. Т. 14. №1. С. 49–64. DOI:10.30533/scidata-2023-14-04.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Канопус-В, Кондор, Кондор-ФКА, космическая съемка, дистанционное зондирование Земли, радиолокационная съемка, влияние облачности, Isee, Sequoia

АННОТАЦИЯ

С 2015 года в российской космической группировке отсутствовали космические аппараты (КА), способные вести радиолокационную съемку. После вывода из эксплуатации предыдущего спутника, оснащенного таким съемочным оборудованием, замена создавалась длительное время. Данный тип съемочного оборудования значительно отличается от привычного оптико-электронного. Несмотря на ряд преимуществ, данные КА имеют некоторые недостатки. В статье рассмотрены различия между способами получения пространственных данных, в том числе обусловленные установкой съемочного оборудования. Исследовано влияние погодных условий на получаемые снимки местности, для чего было проанализировано 2304 снимка на 17 контрольных участках в разных частях РФ. Оценена возможность использования снимков с радиолокационных КА для применения в кадастровой деятельности на основе требований к точности и методам

определения координат характерных точек [значения точности (средней квадратической погрешности) определения координат характерных точек границ земельных участков], сформулированных в приложении 1 к Приказу Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 23 октября 2020 г. № П/0393, и при реализации федеральных проектов на примере программы развития Северного морского пути.

1 Введение

В течение длительного времени в российской орбитальной группировке отсутствовал такой источник данных, как космический аппарат (КА), производящий радиолокационную съемку, однако этот инструмент может быть применен для решения различных задач благодаря возможности работы в ночное время и зимний период независимо от облачности.

Цель данной работы — рассмотреть перспективы применения снимков с КА, оснащенных радиолокационным съемочным оборудованием, для применения в кадастровой деятельности и реализации различных федеральных программ.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- изучить статистику работы КА с оптико-электронной съемочной аппаратурой;
- проанализировать и понять, для какой местности снимки с КА с радиолокационным съемочным оборудованием будут наиболее полезными;
- изучить опыт эксплуатации иностранных группировок с радиолокационной съемочной аппаратурой;
- оценить, в каких аспектах федеральных национальных проектов снимки будут наиболее применимы.

Исследование перспектив использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с радиолокационных спутников крайне актуально ввиду вывода на орбиту 27 мая 2023 г. радиолокационного спутника российской группировки «Кондор-ФКА» №1.

2 Материалы и методы

В исследовании были использованы материалы, полученные как с российских, так и с иностранных космических группировок от аппаратов с различными типами съемочной аппаратуры. В ходе экспериментов было проведено сравнение полученных материалов и определена возможность их использования в кадастровой деятельности. Одновременно с этим выполнена аналитическая работа по изучению нормативно-правовой документации.

2.1 Условия и факторы, влияющие на данные, получаемые с КА

Во-первых, следует проанализировать требования к значениям точности, которые предъявляются к данным ДЗЗ, полученным фотограмметрическим «методом определения координат характерных точек» границ земельных участков. В исследовании рассматривается ряд категорий земель, для которых в настоящее время требование к точности съемки с КА однозначно не позволяет достигнуть средней квадратической погрешности (СКП), необходимой для наиболее ценных земельных участков. Следует отметить, что даже лучшие образцы западных радиолокационных спутников высокого разрешения не дадут возможности получить проекцию пикселя на местности лучше 0,5 м, что, в свою очередь, сужает перспективы использования. Однако земли лесного, водного фонда и земли запаса составляют почти 70 % территории РФ, а требования к проекции пикселя для данной категории земель составляет 0,6 м, что позволяет основательно рассмотреть перспективы использования полученной продукции. Статистика представлена на **Рисунке 1**.

Материалы, полученные со спутников, более привлекательны для потребителя с экономической точки зрения по сравнению с прочими методами получения данных (**Табл. 1**). В настоящее время сложно определить стоимость данных ДЗЗ, полученных с радиолокационных спутников российской группировки, однако можно отметить, что спутниковая информация — зачастую один из наиболее дешевых источников данных ДЗЗ.

Рис. 1 Соотношение видов земельных участков в РФ.

Fig. 1 Test areas on the territory of the Russian Federation.

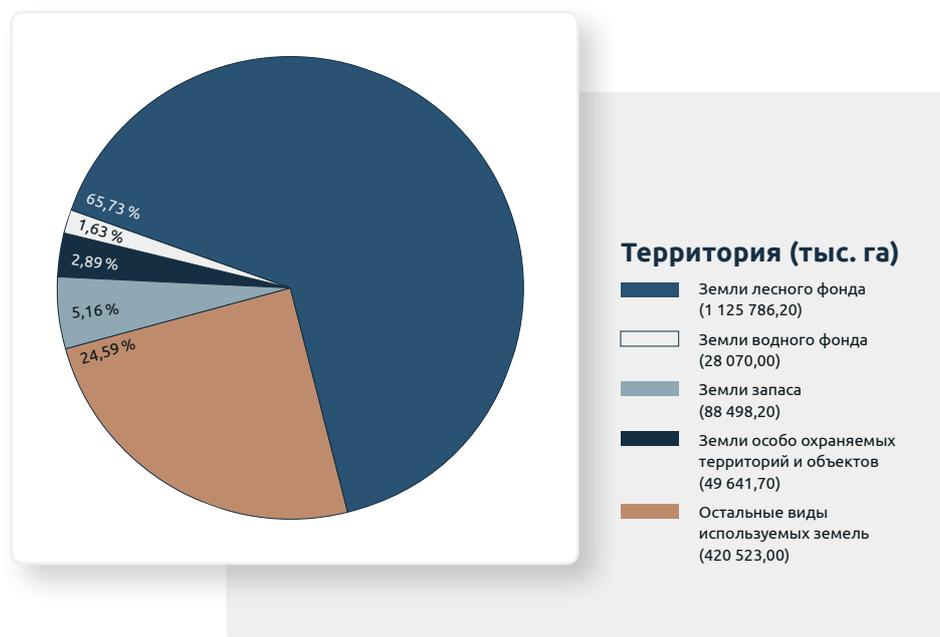


Таблица 1 Сравнение стоимости данных ДЗЗ, полученных из различных источников.

Table 1 Cost of remote sensing data from different sources.

Вид данных	Стоимость
Квадратный километр архивной съемки с аппаратов типа «Канопус-В» в панхроматическом режиме через Геопортал Госкорпорации «Роскосмос»	Около 30 руб.
1 км ² архивной съемки с аппаратов типа «Ресурс-П» в панхроматическом режиме через Геопортал Госкорпорации «Роскосмос»	Около 100 руб.
Съемки территорий с помощью беспилотного летательного аппарата за 1 км ² в масштабе 1 : 10 000 с проекцией пикселя на местности в 25 см	В среднем 20 тыс. руб. + затраты на логистику
Аэрофотосъемка с использованием самолета за летный час и услуги пилота; без камеральных работ	От 35 тыс. руб.

В рамках исследования приведена статистика по 2304 снимкам на 17 тестовых участках по территории РФ, полученных с КА типов «Канопус-В» и «Ресурс-П» за 12,5 лет с 01.01.2010 по 22.06.2022 (**Рис. 2**).

Сравнив процент облачности, можно отметить, что практически на 1/2 космических снимков облачность составляет менее 30 % для каждого, а доля снимков, непригодных для дальнейшего использования составляет, 1/4 от их общего числа.

Все снимки контрольных участков можно условно отнести к трем регионам. Данные ДЗЗ, полученные в северных широтах, непригодны для обработки — каждый третий снимок выше 65-й параллели из-за высокого процента облачности,

Рис. 2 Тестовые участки на территории РФ.

Fig. 2 Test areas on the territory of the Russian Federation.

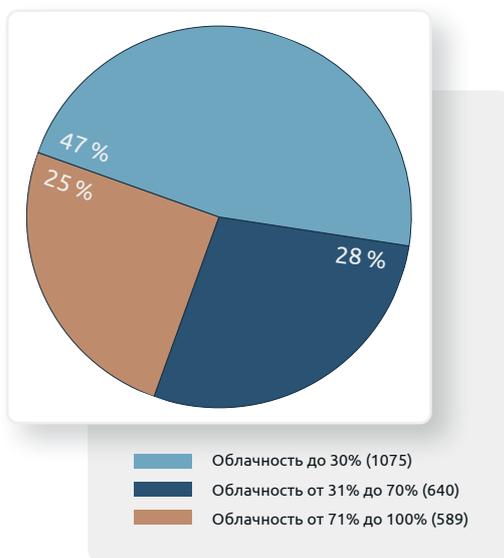


в то время как центральный и южный регионы можно определить как наиболее подходящие для оптико-электронной съемки. Процент безоблачных снимков в направлении с севера на юг стабильно возрастает (Рис. 3).

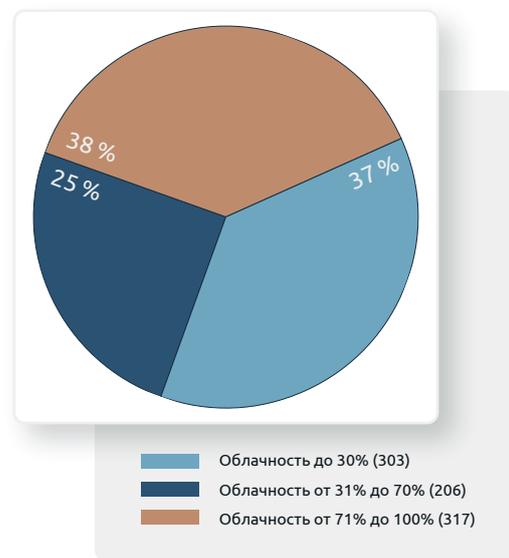
Рис. 3 Статистика снимков по облачности.

Fig. 3 Image statistics by cloudiness.

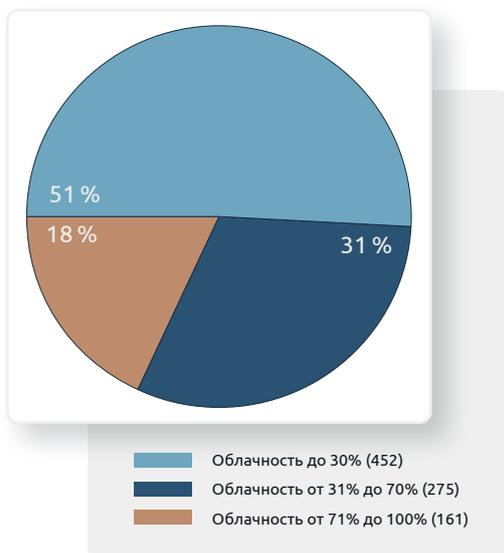
Общие данные для всех контрольных участков



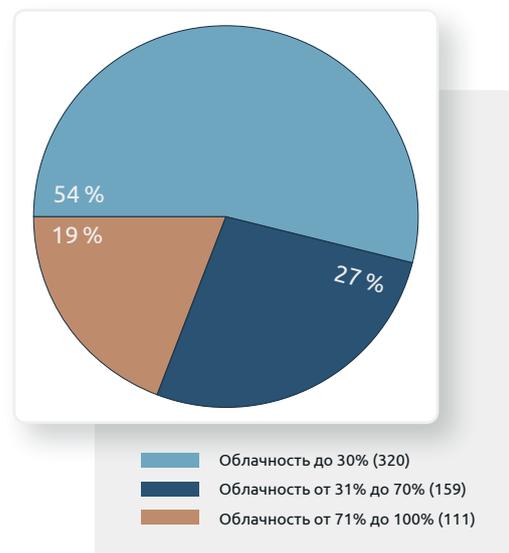
Процент облачности на северных контрольных участках выше 65-й параллели



Процент облачности на контрольных участках в центральной России



Процент облачности на южных контрольных участках



2.2 Технические характеристики космических радиолокационных аппаратов

В **Таблице 2** приведены технические характеристики российского радиолокационного аппарата. В режиме наибольшей точности съемки разрешение будет достигать 1 м. Согласно действующему законодательству использование таких данных даже для земель, отнесенных к лесному, водному фонду и землям запаса, для кадастрового учета недопустимо. Кроме того, в зависимости от ширины полосы снижается качество изображения. Также следует отметить длительность цикла съемки: аппарат сможет повторно переснять территорию через 16 дней, что в сочетании с малым количеством спутников в группировке представляет некоторые трудности — оператору необходимо с особой тщательностью определять приоритетные территории для съемки.

Далее представлено сравнение результатов съемки одной местности с помощью радиолокационного и оптико-электронного спутников, имеющих на снимках приблизительно равную проекцию пикселя на местности. Ввиду отсутствия на момент написания статьи снимков с перспективного спутника был использован архивный снимок с аппарата прошлого поколения.

Для демонстрации преимущества радиолокационной съемки был выбран район с высокой облачностью. Следует отметить, что остров Онекотан был отснят с одного раза, досъемка не потребуется, в отличие от КА «Канопус-В», который должен переснять оставшуюся часть района.

Как видно на **Рисунке 4**, ввиду расположения камеры сбоку спутника съемка происходит не в надир, из-за чего некоторые объекты могут быть скрыты рельефом. Так, на снимке с КА типа «Канопус-В» хорошо видны точки на острове, а на снимке с КА типа «Кондор» объект интереса может быть скрыт (**Рис. 5**).

Далее приведено сравнение российского радиолокационного аппарата с иностранными. Техническая характеристика КА Sequoia фирмы Capella Space приведена в **Таблице 3**. Во-первых, масса данного спутника в 10 раз меньше.

Таблица 2 Технические характеристики КА типа «Кондор-ФКА».

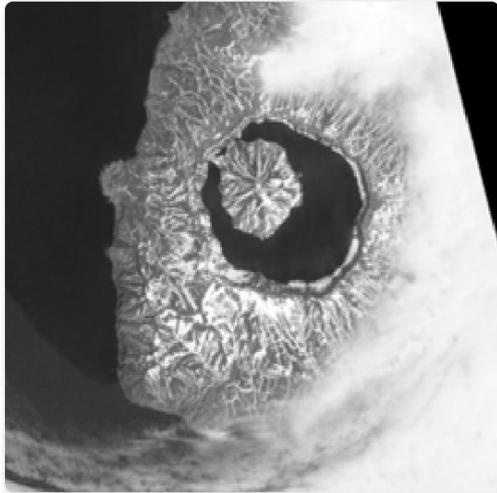
Table 2 Technical characteristics of Kondor-FKA type satellites.

Параметр		Значение
Орбита		солнечно-синхронная
Высота, км		518
Наклонение, град.		97
Масса, кг		около 1100
Оборудование		SAR
Разрешение, м	детальный прожекторный режим	1–2
	детальный непрерывный режим	1–3
	обзорный режим	6–12
Точность геопозиционирования, м		10–30
Период повторной съемки, дни		16

Рис. 4 Снимки острова Онекотан.

Fig. 4 Images of Onekotan Island.

Снимок с КА типа «Канопус-В»



Снимок с КА типа «Кондор»

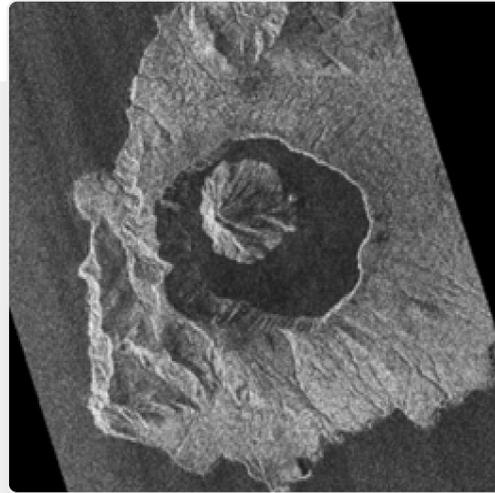
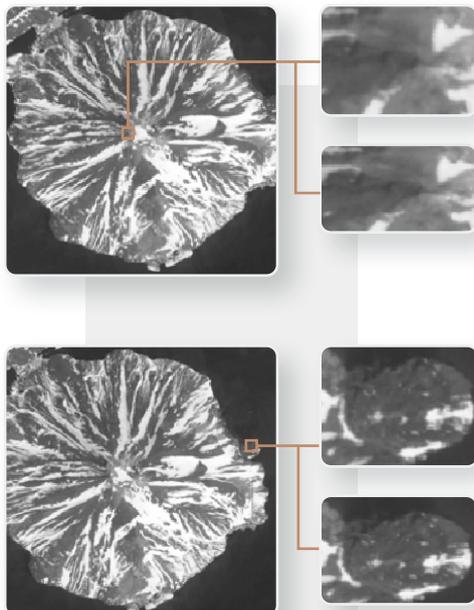


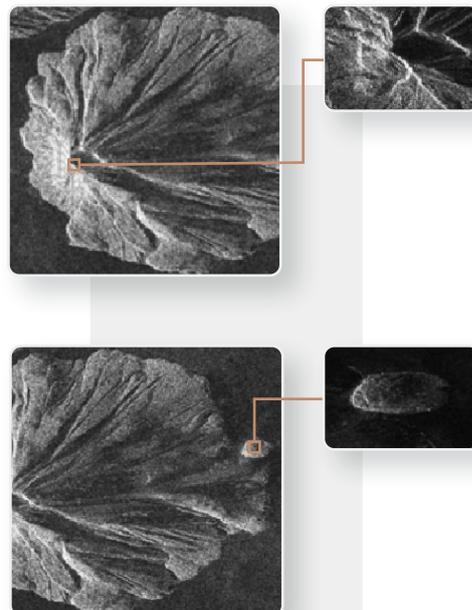
Рис. 5 Особенности съемки с КА типа «Канопус-В» и КА типа «Кондор».

Fig. 5 Features of imagery from Canopus-B and Condor satellites.

Снимки с КА типа «Канопус-В»



Снимки с КА типа «Кондор»



Во-вторых, цикл съемки аппарата составляет всего 6 часов, а это, в совокупности с группировкой, на порядок больше, чем у КА «Кондор-ФКА», что позволяет добиться, при необходимости, съемки в реальном времени. Однако следует отметить, что в наиболее точном режиме проекция пикселя на местности достигает всего 0,5 м, а значит, в мире уже существуют радиолокационные спутники, которые отвечают требованиям проекции пикселя на местности для нужд кадастровой деятельности на участках лесного, водного фондов и земель запаса. Необходимо стремиться к аналогичному результату для российской группировки КА.

На **Рисунках 6 и 7** приведен пример съемки с аппарата Capella Sequoia. Следует отметить, что на участке присутствует наклон изображения. На **Рисунке 8** представлена та же местность, отснятая с КА типа «Канопус-В».

Рис. 6 Снимок с КА Capella Sequoia.

Fig. 6 Capella Sequoia satellite image.



Таблица 3 Технические характеристики КА типа «Кондор-ФКА».

Table 3 Technical characteristics of Kondor-FKA type satellites.

Параметр		Значение
Орбита		солнечно-синхронная
Высота, км		500
Наклонение, град.		90
Масса, кг		около 100
Оборудование		SAR
Разрешение на местности, м	детальный режим	0,5
	обзорный режим	1,2
	маршрутный режим	1,0
Период повторной съемки, ч		6
Полоса захвата, км	детальный режим	5×5
	обзорный режим	5×20
	маршрутный режим	5×10

Рис. 8 Снимок с КА типа «Канопус-В».

Fig. 8 Kanopus-B satellite image.



Рис. 7 Особенности съемки КА Capella Sequoia.

Fig. 7 Features of Capella Sequoia satellite imagery.

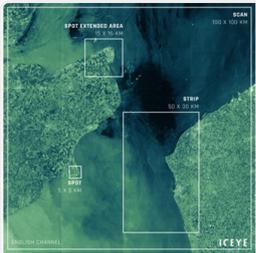
Еще один иностранный радиолокационный аппарат — Iceye. Из **Таблицы 4** видно, что по характеристикам он ближе к КА Capella Sequoia, чем к КА типа «Кондор». Аналогичны масса, период повторной съемки и размер проекции пикселя.

На **Рисунке 9** представлены параметры снимков, которые можно изменять в зависимости от поставленной задачи и условий. Наиболее точный режим «Spot» позволяет отснять небольшую площадь, но дает возможность снимать гораздо чаще. Кроме того, состав группировки нивелирует этот недостаток.

Как отмечалось ранее, при съемке другими аппаратами указан важный для кадастра нюанс — возможность наличия наклона при получении изображения из-за особенностей размещения съемочного оборудования. Iceye — не исключение: наклон можно увидеть на **Рисунке 10**.

Рис. 9 Пример изменения параметров снимка с КА типа Iceye.

Fig. 9 Example of changing parameters of the Iceye satellite image.



IMAGING MODE	UNITS	STRIP	SPOT	SLEA	SCAN
NOMINAL SWATH WIDTH X LENGTH	KILOMETERS	30 X 50	5 X 5	15 X 15	100 X 100
NOMINAL COLLECTION DURATION	SECONDS	10	10	10	15
SINGLE LOOK SLANT RANGE RESOLUTION	METERS	0.5 TO 2.5	0.5	0.5	N/A
SINGLE LOOK AZIMUTH RESOLUTION	METERS	3	0.25	1	N/A
GROUND RANGE RESOLUTION	METERS	3	1	1	15
GROUND AZIMUTH RESOLUTION	METERS	3	1	1	15
RANGE LOOKS		1	110.2	110.2	1
AZIMUTH LOOKS		110.2	4	1	1
INCIDENCE FOR NOMINAL PERFORMANCE	DEGREES	15 - 30	20 - 35	20 - 35	21 - 29
NESS	DB	+21.5 TO -00	-18.5 TO -15	-18.5 TO -15	-02.2 TO 01.5
MAXIMUM IMAGE DURATION	SECONDS	70	10	10	75
MAXIMUM IMAGE LENGTH	KILOMETERS	500	N/A	N/A	500

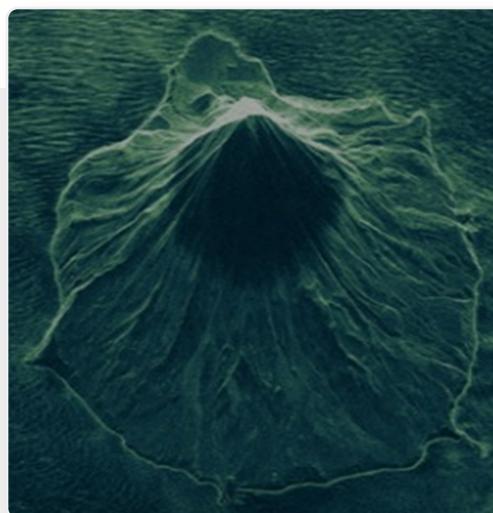
Таблица 4 Технические характеристики КА Iceye.

Table 4 Technical characteristics of Iceye spacecraft.

Параметр		Значение
Орбита		солнечно-синхронная
Высота, км		570
Наклонение, град.		98,6; 100,7
Масса, кг		85
Оборудование		SAR
Разрешение на местности, м	режим Strip	0,5–2,5
	режим Spot	0,5
	режим Slea	0,5
	режим Scan	до 15,0
Динамический диапазон, бит		16
Точность геопозиционирования, м		до 10

Рис. 10 Особенности съемки с КА типа Iceye.

Fig. 10 Features of imaging from Iceye satellites.



В этой связи наиболее перспективная роль российских радиолокационных спутников связана с работой в условиях севера. Данные перспективы отражены в распоряжении Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р, в котором утвержден План развития Северного морского пути на период до 2035 года. Наибольший интерес в контексте данного исследования представляет подпункт 2.1.9 «Строительство морского терминала по отгрузке свинцово-цинкового концентрата на архипелаге Новая Земля». На момент проведения исследования там находится земельный участок, относящийся к категории земель особо охраняемых территорий, и, вероятно, часть земли будет переведена в категорию земель промышленности, где будут выполняться строительные работы. Мониторинг строительства и прилегающих территорий будет целесообразно вести с помощью КА типа «Кондор-ФКА».

3 Результаты

По результатам анализа нормативно-правовой документации, в частности приказа Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 23 октября 2020 г. №П/0393 (далее — приказ №П/0393), можно констатировать, что даже в наиболее точном режиме съемки аппараты типа «Кондор-ФКА» не могут до принятия соответствующих изменений в законодательстве использоваться для кадастровых работ. Однако можно рассмотреть результаты съемок с иностранных КА, часть которых отвечает необходимым требованиям, предъявляемым к земельным участкам лесного фонда, водного фонда и землям запаса.

Опираясь на статистику облачности для территории РФ, можно отметить, что наиболее облачными являются северные широты. Процент удачных снимков с оптико-электронных КА по этому параметру там гораздо ниже, чем в южных регионах. Следовательно, применение аппаратов, оснащенных радиолокационным съемочным оборудованием, будет более целесообразно именно в этой местности, так как они не зависят от данного параметра. В ходе реализации комплексной программы развития Северного морского пути множество инфраструктурных проектов будет нуждаться в спутниковых данных ДЗЗ.

4 Обсуждение

Выявлено, что в первую очередь радиолокационные снимки необходимы для северных и береговых территорий РФ, где доля снимков с облачностью менее 30% составляет в среднем 40%. Данные ДЗЗ, полученные с таких

аппаратов, позволят сократить количество необходимых попыток съемки одной и той же территории.

Несмотря на независимость от погодных условий, объем полученных данных с двух планируемых КА типа «Кондор» будет недостаточен для покрытия территории РФ необходимым количеством снимков, пригодных для ведения стабильной кадастровой деятельности, однако это реализуемо для конкретных инфраструктурных проектов федерального значения.

Принципиальное отличие по времени цикла повторной съемки российских радиолокационных аппаратов от западных аналогов, а также запланированное малое количество спутников затрудняют регулярное обновление информации для районов интереса.

Несмотря на перспективность применения радиолокационных спутников, особенно в северном регионе РФ, для использования в кадастровой деятельности из-за размера проекции пикселя на снимках радиолокационные спутники российской группировки непригодны.

Исходя из вышеперечисленного **можно сформулировать следующие рекомендации:**

1. Восстановить группировку КА типа «Ресурс-П» в части работы с данными ДЗЗ, необходимыми в качестве основы для кадастровых работ.
2. Пересмотреть законодательство относительно размера проекции пикселя на местности для категории земель лесного фонда, водного фонда и земель запаса в части смягчения требований к ним для возможности использования КА типа «Кондор-ФКА» и КА типа «Канопус-В» в кадастровой деятельности.
3. Рассмотреть возможность расширения группировки КА типа «Кондор-ФКА», так как объем получаемых снимков слишком мал для территории РФ.
4. Пересмотреть концепцию строительства КА с радиолокационным съемочным оборудованием на основе опыта использования группировок КА иностранных фирм.

5 Выводы

В настоящее время КА типа «Кондор-ФКА» непригодны для применения в кадастровой деятельности. Несмотря на то, что СКП данных, полученных с КА, гипотетически может соответствовать требованиям, приведенным в приложении 1 к приказу №П/0393, требуемая проекция пикселя на местности в настоящее время недостижима. Вместе с тем иностранные космические группировки уже достигли этих характеристик в наиболее точном режиме съемки, и это дает основания полагать, что последующие серии российских КА смогут получать данные ДЗЗ необходимого качества. С большой долей вероятности потребуются внести изменения в концепцию российского спутникостроения, чтобы достигнуть

необходимых результатов, кроме того, существует задача по стандартизации производства КА. Это позволит российской космической группировке ускоренными темпами достичь необходимой численности аппаратов.

На сегодняшний день следует применить материалы, полученные с рассматриваемых аппаратов, для решения задач федеральных проектов, особенно в регионах со сложной погодной обстановкой, где они будут особенно полезны благодаря своим преимуществам. Также представляется целесообразным пересмотр ряда положений приказа №П/0393.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному руководителю Т.В. Илюшиной, доктору географических наук, доценту МИИГАиК; И.И. Кузнецову и В.Ю. Мельникову, специалистам НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы»; А.Г. Чибуничеву, доктору технических наук, профессору МИИГАиК; В.М. Куркову, кандидату технических наук, доценту МИИГАиК за важные замечания при проведении исследования.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Тюлин А.Е., Селин В.А., Емельянов А.А. и др. Синтез рационального состава орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // К.Э. Циолковский и прогресс науки и техники в XXI веке: материалы 56-х научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Т. 1. Калуга: Эйдос Калуга, 2021. С. 39–42.
2. Тюлин А.Е., Селин В.А., Емельянов А.А. Актуализация приоритетов развития отечественной отрасли дистанционного зондирования Земли из космоса // Материалы XXII Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация». М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. С. 17–18.
3. Заичко В.А., Селин В.А. Мероприятия федерального космического агентства России по созданию космических средств радиолокационного наблюдения и технологий комплексной обработки данных // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. №5. С. 4–5.
4. Голов Н.А., Усачёв В.А., Корянов В.В., Топорков А.Г. Перспективные технологии создания космического комплекса радиолокационного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей легкого класса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. №5. С. 1–19. DOI:10.18698/2308-6033-2019-5-1881.
5. Хатиб А., Малинников В.А. Интеграция результатов независимых классификаций разновременных материалов космической съемки для повышения достоверности выявления изменения объектов земной поверхности // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. №65. С. 175–183. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-175-183.
6. Беленко В.В., Шамина К.Н. Методика мониторинга разлива нефти при авариях на морских нефтегазовых месторождениях по материалам космической

съемки // Естественные и технические науки. 2021. №8. С. 112–121. DOI:10.25633/ETN.2021.08.11.

7. Кравцова В.И., Ерлич В.А. Картографическая оценка возможностей градостроительного использования территории Новой Москвы // Геодезия и картография. 2015. №5. С. 20–32. DOI:10.22389/0016-7126-2015-899-5-20-32.
8. Хвостиков С.А., Барталёв С.А. Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. №5. С. 9–27. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27.
9. Барталёв С.А., Ховратович Т.С. Анализ возможностей применения методов сегментации спутниковых изображений для выявления изменений в лесах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. №1. С. 44-62.
10. Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Барталёв С.А. и др. Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. №4. С. 7–16.

АВТОРЫ

Новиков Сергей Сергеевич

Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)

АО «Российские космические системы», Москва, Россия

 0000-0002-4927-4542

Новикова Полина Евгеньевна

Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)

АО «Российские космические системы», Москва, Россия

 p.novikova93@mail.ru

 0000-0001-8474-440X

Поступила 25.05.2023. Принята к публикации 23.06.2023. Опубликовано 30.06.2023.

UDC 528.4, 528.8

DOI:10.30533/scidata-2023-14-04



Prospects of using radar satellites in monitoring and cadastral activities

Sergey S. Novikov¹✉, Polina E. Novikova¹

AFFILIATIONS

¹ Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”,
Moscow, Russia

✉ s.novikov92@inbox.ru

CITATION

Novikov SS, Novikova PE. Prospects of using radar satellites in monitoring and cadastral activities. *Spatial Data: science, research and technology*. 2023;14(1): 49–64. DOI:10.30533/scidata-2023-14-04.

KEYWORDS

Kanopus-B, Condor, Condor-FSA, space imagery, remote sensing of the Earth, cadastral activities, radar imagery, influence of cloud cover, federal program

ABSTRACT

For the last 8 years, the Russian space constellation has lacked spacecraft capable of radar imaging. The previous satellite equipped with such imaging equipment was decommissioned in April 2015, and it took a long period of time to build new ones to replace it. This type of imaging equipment differs significantly from the usual optical-electronic imaging equipment. Despite a number of advantages, these spacecrafts have some disadvantages. In this paper the differences between these types of spatial data acquisition are considered, including those caused by different methods of survey equipment installation. The influence of weather conditions on the received terrain images was studied, for this purpose 2304 images were analyzed at 17 control areas in different parts of the Russian Federation. The possibility of using images from radar satellites for application in cadastral activities was assessed based on the requirements

to accuracy and methods of characteristic point coordinates determination (accuracy values (mean square error) of characteristic point coordinates determination for land plot boundaries) formulated in Annex 1 of the Order of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography No. P/0393 dated October 23, 2020, and during implementation of federal projects using the example of the Northern Sea Route development program.

REFERENCES

1. Tyulin AE, Selin VA, Emelianov AA, et al. Sintez raional'nogo sostava orbital'noi gruppировки kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniia Zemli [Synthesis of the rational composition of the orbital grouping of Earth remote sensing spacecraft]. *K.E. Tsiolkovsky and the progress of science and technology in the XXI century: proceedings of 56th scientific readings devoted to the development of scientific heritage and the development of K.E. Tsiolkovsky's ideas*. Kaluga: Eidos Kaluga, 2021: 39–42. (In Russian).
2. Tyulin AE, Selin VA, Emelianov AA. Aktualizatsiia prioritetov razvitiia otechestvennoi otrasli distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa [Updating the priorities for the development of the domestic industry of remote sensing of the Earth from space]. *Proceedings of the XXII International Scientific Conference "System Analysis, management and Navigation"*. Moscow: Moscow Aviation Institute (National Research University). 2018: 17–18. (In Russian).
3. Zaichko VA, Selin VA. Meropriyatiya federal'nogo kosmicheskogo agentstva Rossii po sozdaniyu kosmicheskikh sredstv radiolokatsionnogo nablyudeniya i tekhnologii kompleksnoi obrabotki dannykh [Russian federal agency activities for the creation of the space radar observation facilities and integrated data processing technologies]. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2013;5: 4–5. (In Russian).
4. Golov NA, Usachev VA, Koryanov VV, Toporkov AG. Perspektivnye tekhnologii sozdaniya kosmicheskogo kompleksa radiolokatsionnogo zondirovaniya Zemli na baze malykh kosmicheskikh apparatov i raket-nositelei legkogo klassa [Promising technical solutions for the space complex of the Earth's radar sensing based on small spacecraft and light-class launch vehicles]. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2019;5: 1–19. (In Russian). DOI:10.18698/2308-6033-2019-5-1881.
5. Khatib A., Malinnikov V.A. Integratsiya rezul'tatov nezavisimykh klassifikatsii raznovremennykh materialov kosmicheskoi s'emki dlya povysheniya dostovernosti vyyavleniya izmeneniya ob"ektov zemnoi poverkhnosti [Collecting results of independent classifications of space survey multi-temporal materials to improve the reliability of detecting changes of the Earth's surface objects]. *Izvestia vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"*. 2021;65(2): 175–183. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-175-183.
6. Belenko VV, Shamina KN. Metodika monitoringa razliva nefti pri avarijah na morskikh neftegazovykh mestorozhdeniyah po materialam kosmicheskoi s'jomki [Methodology of oil spill monitoring in case of accidents at offshore oil and gas fields using space imagery]

- data]. *Natural and technical sciences*. 2021;8: 112–121. (In Russian). DOI:10.25633/ETN.2021.08.11.
7. Kravtsova VI, Erlich VA. Kartograficheskaya otsenka vozmozhnostei gradostroitel'nogo ispol'zovaniya territorii Novoi Moskvy [Cartographic assessment of the possibilities of urban using the territory of New Moscow]. *Geodesy and cartography*. 2015;5: 20–32. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2015-899-5-20-32.
 8. Khvostikov SA, Bartalev SA. Vozmozhnosti primeneniya dannykh sputnikovogo monitoringa dlya modelirovaniya dinamiki razvitiya prirodnykh pozharov [Use of remote sensing data in wildfire modelling]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2021;18(5): 9–27. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27.
 9. Bartalev SA, Khovratovich TS. Analiz vozmozhnostei primeneniya metodov segmentatsii sputnikovykh izobrazhenii dlya vyyavleniya izmenenii v lesakh [Assessment of satellite images segmentation methods for forest change detection]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(1): 44–62. (In Russian).
 10. Kashnitsky AV, Loupian EA, Bartalev SA, et al. Optimizatsiya interaktivnykh protsedur kartografirovaniya garei v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa prirodnykh pozharov [Optimization of burn mapping interactive procedures in remote fire monitoring information systems]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2015;12(4): 7–16. (In Russian).

AUTHORS

Sergey S. Novikov

Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”,
Moscow, Russia

 0000-0002-4927-4542

Polina E. Novikova

Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”,
Moscow, Russia

 p.novikova93@mail.ru

 0000-0001-8474-440X

Submitted: May 25, 2023. Accepted: June 23, 2023. Published: June 30, 2023.



Оценка существенности коррелированности измерений при их математической обработке

И.А. Клыпин^{1,2}✉, А.А. Алексеева^{1,3}

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Центр геодезии, картографии и ИПД, Москва, Россия

³ Метрогипротранс, Москва, Россия

✉ uvcgf@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Клыпин И.А., Алексеева А.А. Оценка существенности коррелированности измерений при их математической обработке // Пространственные данные: наука и технологии. 2023. Т. 14. № 1. С. 65–75. DOI:10.30533/scidata-2023-14-10.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

геодезические измерения, корреляция, весовая матрица, оценка точности вычислений

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается возможность замены плотной весовой (либо обратной весовой) матрицы коррелированных между собой измерений на соразмерную ей единичную матрицу (или кратную таковой) и, соответственно, выполнения в таком случае упрощенного приближенного, а не строгого уравнивания ввиду того, что на практике в рамках математической обработки весьма широко распространен переход от непосредственно выполненных измерений к их функциям, обычно разностям или суммам, коррелированным между собой, но свободным от влияния тех или иных возмущающих факторов, которое носит систематический характер. Получены критерии установления такой возможности на основе применения неравенства Канторовича и вычисления относительной эффективности получаемых при приближенном уравнивании оценок. Рассмотрено применение этих критериев для математической обработки угловых измерений

на станции. Показано, что, если угловые измерения выполнены по способу круговых приемов, распределение поправки за незамыкание горизонта позволяет рассматривать эти измерения равноточными и не коррелированными между собой. Сделан вывод о возможности распространения данного подхода также на спутниковые измерения и применения полученных критериев в том числе в их случае.

1 Введение

Нередко в геодезической практике обрабатываемые измерения оказываются коррелированными, особенно когда в качестве таковых рассматриваются не непосредственно выполненные измерения, а их некоторые функции, обычно разности или суммы, переход к которым, как известно, является одним из наиболее эффективных способов по исключению влияния различного рода возмущений, носящего систематический характер. В то же время, как известно из теории уравнительных вычислений, при уравнивании весовую матрицу измерений вполне возможно заменять на любую соразмерную ей невырожденную матрицу [1]. Представляет определенный интерес возможность использования вместо плотной весовой матрицы коррелированных измерений матрицы единичной (либо кратной таковой в зависимости от выбранной единицы веса). Однако уравнивание в таком случае будет лишь приближенным, а получаемые оценки искомых величин (параметров) — менее эффективными.

В разное время данный вопрос изучался как применительно к измерениям конкретного вида [2–5], так и применительно к их последовательному учету при математической обработке [1, 6, 7]. В настоящее время он также актуален [8–10], поскольку замену плотной матрицы на единичную в рамках математической обработки геодезических измерений можно рассматривать как один из возможных путей для оптимизации уравнительных вычислений [11], направленной на уменьшение объема производимых вычислительных операций и их упрощение, и, соответственно, считать в дополнение к обозначенным ранее одной из современных задач уравнительных вычислений [12].

2 Материалы и методы

Оценки искомых величин при строгом и приближенном уравнивании находятся по различным формулам. При строгом уравнивании

1

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^{(0)} + (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}_Y^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_Y^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^{(0)}).$$

При приближенном уравнивании (когда весовая матрица заменяется кратной единичной)

2

$$\bar{\mathbf{X}}_E = \mathbf{X}^{(0)} + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^{(0)}).$$

Их различие может быть охарактеризовано относительной эффективностью, рассчитываемой как частное от деления детерминанта (определителя) обратной весовой матрицы первой оценки на детерминант обратной весовой матрицы второй таковой:

3

$$e = \frac{\det \mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{X}}}}{\det \mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{X}}_E}}.$$

Наименьшее из возможных значений данной характеристики может быть установлено исходя из неравенства Канторовича [13–15], левая граница которого, в свою очередь, определяется как функция от числа обусловленности обратной весовой матрицы измерений¹:

4

$$4\alpha / (1+\alpha)^2 \leq e \leq 100\%,$$

5

$$\alpha = \lambda_{\max} / \lambda_{\min},$$

где λ_{\max} и λ_{\min} — соответственно наибольшее и наименьшее собственные числа обратной весовой матрицы измерений.

Чем ближе к нулю эта граница, тем менее эффективными могут оказаться полученные при приближенном уравнивании оценки и тем меньше оснований полагать возможной замену строгого уравнивания приближенным. Таким образом, вычисленная относительная эффективность позволяет судить в том числе о возможности замены на единичную весовой матрицы коррелированных измерений.

3 Результаты

В качестве примера, как и в [9], если рассматривать случай угловых измерений на станции, пусть измерено пять направлений (**Рис. 1**). Все измерения этих направлений равноточны, некоррелированы и характеризуются равной единичной весовой матрицей (в качестве единицы веса рассматривается измерение одного направления).

Если каждое из n направлений измерялось единожды, то при переходе к измерениям углов последние будут характеризоваться уже обратной весовой

¹ Подробнее о неравенстве Канторовича и его существующих вариациях можно ознакомиться в работе Alpargu G. The Kantorovich Inequality with Some Extensions and with Some Statistical Applications. Montreal: McGill University, 1996. 113 p.

6

матрицей размера $n \times n$, которая будет иметь следующий вид:

$$Q_Y = \begin{pmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{pmatrix}.$$

Согласно выполненным и представленным в **Таблице 1** расчетам относительная эффективность в данном случае зависит от числа измеренных направлений, резко уменьшается с увеличением их числа и уже при пяти может составлять менее 50%.

Чтобы понять, насколько это существенно, можно применить известный принцип ничтожного влияния к обобщенной дисперсии, характеризующей точность установления взаимного положения пунктов в сети и по совместительству равной определителю обратной весовой матрицы получаемых оценок. Переходя от малой величины ε (чаще всего принимаемой за 0,05) к вспомогательной величине k , легко получить критерии для оценки существенности деформации геодезической сети, связанной с потерей точности при ее математической обработке:

7

$$\frac{1}{k} \det Q_{\bar{x}_\varepsilon} \leq \det Q_{\bar{x}},$$

8

$$k = 1 / (1 - \varepsilon)^2,$$

9

$$e \geq (1 - \varepsilon)^2,$$

10

$$\alpha \leq (\sqrt{k-1} + \sqrt{k})^2.$$

Ввиду того, что все эти критерии так или иначе связаны с относительной

Рис. 1 Угловые измерения на станции.

Fig. 1 Angle measurements at the station.

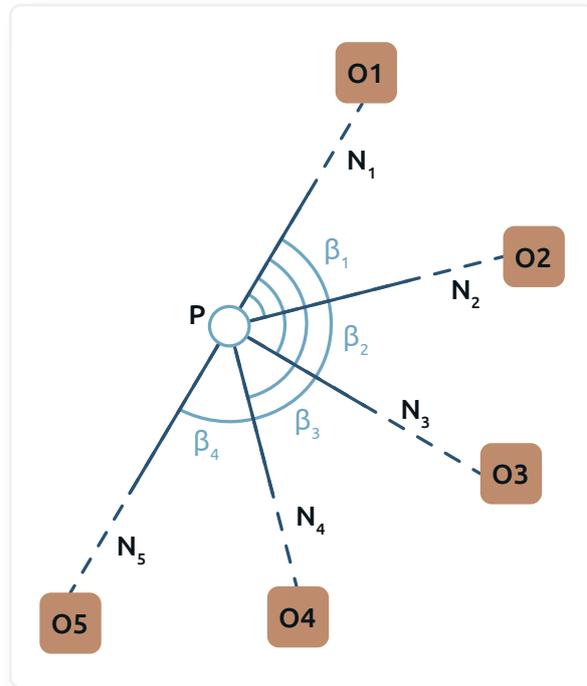


Таблица 1 К расчету относительной эффективности при замене на единичную весовой матрицы угловых измерений.

Table 1 On the calculation of the relative efficiency when replacing the weight matrix of angular measurements with a unit one.

$n-1$	λ_{\max}	λ_{\min}	$e_{\min}, \%$
1	1	1	100
2	3	1	75
3	4	1	64
4	5	1	56
5	6	1	49
6	7	1	44
7	8	1	40
8	9	1	36
9	10	1	33
10	11	1	31

эффективностью, по ним можно оценить целесообразность перехода от строгого уравнивания к приближенному и выполнить оценку существенности коррелированности измерений между собой. Таким образом, все эти критерии можно также полагать критериями некоррелированности.

Полученные согласно этим критериям предельные значения для относительной эффективности и числа обусловленности при разных ε представлены в **Таблице 2**.

Сопоставляя данные из **Таблицы 2** с данными из **Таблицы 1**, можно сделать вывод, что в рассмотренном случае нельзя считать возможной замену строгого уравнивания приближенным, а измерения углов некоррелированными между собой.

Таблица 2 Предельные значения числа обусловленности и относительной эффективности.

Table 2 Limit values of the condition number and relative efficiency.

ε	$\alpha_{\text{пред.}}$	$e_{\text{пред.}}, \%$
0,05	1,38	90
0,10	1,60	81
0,15	3,23	72

4 Обсуждение

Достаточно часто угловые измерения на станции выполняются по способу круговых приемов, и обычно первое направление измеряется дважды, а в измерения осуществляется распределение поправки за незамыкание горизонта. В таком случае при переходе от n направлений к $(n-1)$ углам само незамыкание горизонта следует рассматривать в качестве дополнительного неизвестного и обратную весовую матрицу Q_Y определения этих углов находить согласно следующей последовательности формул параметрического способа уравнивания.

Сначала находится матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок

11

$$A_N = \left(\begin{array}{c|c} \mathbf{E}^{n \times n} & \mathbf{a}_c^{(n+1) \times 1} \\ \mathbf{e}_1^{1 \times n} & \end{array} \right),$$

отдельные блоки которой определяются как

12

$$\mathbf{e}_1 = (1 \ 0 \ \dots \ 0),$$

13

$$\mathbf{a}_c^T = (0 \ 1/n \ 2/n \ \dots \ 1).$$

Затем формируется матрица частных производных

14

$$F_{\beta} = (-e^{n \times 1} \mid E^{n \times n}),$$

первый блок которой получается согласно

15

$$e = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^T.$$

И наконец вычисляется искомая обратная весовая матрица определения углов:

16

$$Q_Y = F_{\beta} (A_N^T A_N)^{-1} F_{\beta}^T.$$

Если по способу круговых приемов, как на **Рис. 1**, было определено четыре угла, то обратная весовая матрица определения углов (после распределения поправки за незамыкание горизонта) будет равна

17

$$Q_Y = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,250 & 0,500 & 0,750 \\ 0,250 & 1,125 & 0,250 & 0,375 \\ 0,500 & 0,250 & 1,500 & 0,750 \\ 0,750 & 0,375 & 0,750 & 2,125 \end{pmatrix}.$$

Таблица 3 К расчету относительной эффективности при замене на единичную весовой матрицы угловых измерений, выполненных по способу круговых приемов.

Table 3 On the calculation of the relative efficiency when replacing the weight matrix of angular measurements by a unit matrix, performed by the method of circular steps.

$n-1$	λ_{\max}	λ_{\min}	$e_{\min}, \%$
1	1,0	1	100
2	2,0	1,111	92
3	2,5	1	82
4	3,0	1	75
5	3,5	1	69
6	4,0	1	64
7	4,5	1	60
8	5,0	1	56
9	5,5	1	52
10	6,0	1	49

Эффективность оценок в данном случае, как видно из **Таблицы 3**, снижается с ростом числа измеренных направлений не так сильно, как в ранее рассмотренном случае, и, если сопоставлять ее минимально возможные значения e_{\min} из **Таблицы 3** с предельными $e_{\text{пред.}}$ из **Таблицы 2**, определения получаемых таким образом углов можно считать некоррелированными при четырех-пяти направлениях в зависимости от выбранного значения ϵ , притом что большее количество направлений на станциях измеряется редко.

5 Выводы

Таким образом, **подводя итог, можно заключить следующее:**

1. Для определения возможности применения приближенного уравнения вместо строгого можно использовать установленные критерии некоррелированности измерений.

2. С учетом того, что относительная эффективность не зависит от вида выполненных измерений и связана исключительно с их весовой матрицей, принцип распределения поправки за незамыкание горизонта, по мнению авторов, может быть распространен на аналогичные рассмотренному в данной работе варианты перехода от непосредственно выполненных измерений к их разностям, которые можно считать равноточными и не коррелированными между собой (что будет справедливо в том числе для спутниковых измерений).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках федерального проекта «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» на 2021–2030 гг., ЕГИСУ № 1210806000081-5.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Маркузе Ю.И., Голубев В.В. Теория математической обработки геодезических измерений. М.: Академический проект, 2010. 248 с.
2. Маркузе М.Ю. Влияние ошибок координат межевых знаков и их корреляции на точность определения площадей земельных участков с учетом различных построений (засечек) // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2000. № 2. С. 50–55.
3. Аникин С.Н. Алгоритм фильтрации по методу разностных измерений при неизвестном интервале корреляции ошибок измерения // Материалы докладов VIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург, 16 марта — 29 сентября 2006 г. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 245–251.
4. Падве В.А., Косарев Н.С., Сергеев С.А. Обработка и сравнительный анализ результатов ГНСС-измерений с учетом их коррелированности // Материалы Национальной научно-практической конференции «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения». Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 1. С. 198–204.
5. Есина Е.Н., Лиходеевская В.В. Развитие методов уравнивания нивелирных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21, № 1. С. 58–65. DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65.
6. Маркузе Ю.И., Михелев Ю.Д. Исследование результатов уравнивания геодезических сетей с учетом ошибок исходных данных, но без учета их корреляции // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2002. № 4. С. 3–12.
7. Телеганов Н.А. Уравнивание вновь присоединенных геодезических сетей // Гео-Сибирь. 2011. Т. 1, № 1. С. 181–186.
8. Волков В.И., Волков Н.В., Волкова Т.Н. Итерационный метод получения обобщенной средней результатов коррелированных измерений // Успехи современного естествознания. 2021. № 3. С. 35–42. DOI:10.17513/use.37591.

9. Астапович А.В. Способ угловых измерений без систематических ошибок с представлением результатов рядом равноточных независимых направлений // Геодезия и картография. 2022. Т. 83. № 12. С. 2–11. DOI:10.22389/0016-7126-2022-990-12-2-11.
10. Черненко А. Оценка погрешностей разности коррелированных навигационных измерений // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 9(220). С. 102–107. DOI:10.22184/1992-4178.2022.220.9.102.106.
11. Эрлих Л.А. Оптимизация вычислений при уравнивании обширных геодезических сетей // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2020. № 11. С. 32–33.
12. Клыпин И.А. Современные задачи уравнивательных вычислений // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2011. № 4. С. 52–53.
13. Gustafson K. The Trigonometry of Matrix Statistics // International Statistical Review. 2006. № 74(2). P. 187–202.
14. Moslehian M.S. Recent developments of the operator Kantorovich inequality // Expositiones Mathematicae. 2012. Vol. 30. Iss. 4. P. 376–388. DOI:10.1016/j.exmath.2012.08.007.
15. Fika F., Mitrouli M., Turec O. On the estimation of $x^T A^{-1} x$ for symmetric matrices // Electronic Journal of Linear Algebra. 2021. № 37. P. 549–561. DOI:10.13001/ela.2021.5611.

АВТОРЫ

Клыпин Игорь Андреевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра геодезии, геодезический факультет
канд. техн. наук;
ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», Москва, Россия
 0000-0002-6164-566

Алексеева Анастасия Александровна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
геодезический факультет;
АО «Метрогипротранс», Москва, Россия
 0000-0001-8953-9851

Поступила 29.05.2023. Принята к публикации 23.06.2023. Опубликовано 30.06.2023.

UDC 528.1

DOI:10.30533/scidata-2023-14-10



Estimation of the significance of the correlation of measurements in their mathematical processing

Igor A. Klypin^{1,2}✉, Anastasia A. Alekseeva^{1,3}

AFFILIATIONS

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

² Center of Geodesy, Cartography and SDI, Moscow, Russia

³ Metrogiprotrans, Moscow, Russia

✉ uvcgf@mail.ru

CITATION

Klypin IA, Alekseeva AA. Estimation of the significance of the correlation of measurements in their mathematical processing. *Spatial Data: science, research and technology*. 2023;14(1): 65–75. DOI:10.30533/scidata-2023-14-10.

KEYWORDS

geodetic measurements, correlation, weight matrix, estimation of calculation accuracy

ABSTRACT

The article considers the possibility of replacing the weight matrix of correlated measurements with an identity matrix commensurate with it and, accordingly, performing an approximate rather than strict adjustment in this case. Criteria for establishing such a possibility are obtained on the basis of the Kantorovich inequality and the relative efficiency of estimates obtained by approximate adjustment. The application of these criteria for processing the performed angular measurements at the station is considered. It is shown that when they are performed according to the method of circular steps, the distribution of the correction for the non-closure of the horizon allows us to consider the angle measurements as equal and uncorrelated with each other.

REFERENCES

1. Markuze Yul, Golubev VV. *Teoriya matematicheskoi obrabotki geodezicheskikh izmerenii* [Theory of mathematical processing of geodetic measurements]. Moscow: Akademicheskii proekt. 2010. 248 p. (In Russian).
2. Markuze MYu. Vliyanie oshibok koordinat mezhevykh znakov i ikh korrelyatsii na tochnost' opredeleniya ploshchadei zemel'nykh uchastkov s uchetom razlichnykh postroenii (zasechek) [The influence of errors in the coordinates of boundary marks and their correlation on the accuracy of determining the area of land plots, taking into account various constructions (serifs)]. *Izvestia vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"*. 2000;2: 50–55. (In Russian).
3. Anikin SN. Algoritm fil'tratsii po metodu raznostnykh izmerenii pri neizvestnom intervale korrelyatsii oshibok izmereniya [The algorithm of filtering by the method of difference measurements with an unknown interval of correlation of measurement errors]. *Proceedings of the reports of the VIII conference of young scientists "Navigation and motion control"*. Saint Petersburg, 16 March — 29 September 2006. Saint Petersburg: TsNII "Elektropribor". 2006: 245–251. (In Russian).
4. Padve VA, Kosarev NS, Sergeev SA. Obrabotka i sravnitel'nyi analiz rezul'tatov GNSS-izmerenii s uchetom ikh korrelirovannosti [Processing and comparative analysis of GNSS-measurements, based on their correlation]. *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference "Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions"*. Novosibirsk: SGUGiT, 2018;1: 198–204. (In Russian).
5. Esina EN, Likhodeevskaya VV. Razvitie metodov uravnivaniya nivelirnykh setei [Development of methods for equalizing level networks]. *RUDN Journal of Engineering Resources*. 2020;21(1): 58–65. (In Russian). DOI: [10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65](https://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65).
6. Markuze Yul, Mikhelev YuD. Issledovanie rezul'tatov uravnivaniya geodezicheskikh setei s uchetom oshibok iskhodnykh dannykh, no bez ucheta ikh korrelyatsii [Study of the results of adjusting geodetic networks taking into account errors in the source data, but without taking into account their correlation]. *Izvestia vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"*. 2002;4: 3–12. (In Russian).
7. Teleganov NA. Uravnivanie vnov' prisoedinennykh geodezicheskikh setei [Adjustment of newly adjoined geodetic networks]. *Geo-Sibir*. 2011;1(1): 181–186. (In Russian).
8. Volkov VI, Volkov NV, Volkova TN. Iteratsionnyi metod polucheniya obobshchennoi srednei rezul'tatov korrelirovannykh izmerenii [An iterative method for obtaining a generalized average of the results of correlated measurements]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2021;3: 35–42. (In Russian). DOI: [10.17513/use.37591](https://doi.org/10.17513/use.37591).
9. Astapovich AV. Sposob uglovykh izmerenii bez sistematicheskikh oshibok s predstavleniem rezul'tatov ryadom ravnotochnykh nezavisimykh napravlenii [A method of infallible angular measurements representing the results of independent equally accurate directions' number]. *Geodesy and Cartography*. 2022;83(12): 2–11 (In Russian). DOI: [10.22389/0016-7126-2022-990-12-2-11](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2022-990-12-2-11).

10. Chernenko A. Otsenka pogreshnostei raznosti korrelirovannykh navigatsionnykh izmerenii [Estimation of errors in the difference between correlated navigation measurements]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*. 2022;9(220): 102–107. (In Russian).
11. Erlikh LA. Optimizatsiya vychislenii pri uravnivanii obshirnykh geodezicheskikh setei [Optimization of calculations when adjusting extensive geodetic networks]. *Prilozhenie k zhurnalu Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka. Sbornik statei po itogam nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2020;11: 32–33. (In Russian).
12. Klypin IA. Sovremennye zadachi uravnitel'nykh vychislenii [Modern problems of equalization calculations]. *Prilozhenie k zhurnalu Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka. Sbornik statei po itogam nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2011;4: 52–53. (In Russian).
13. Gustafson K. The Trigonometry of Matrix Statistics. *International Statistical Review*. 2006;74(2): 187–202.
14. Moslehian MS. Recent developments of the operator Kantorovich inequality. *Expositiones Mathematicae*. 2012;30(4): 376–388. DOI:10.1016/j.exmath.2012.08.007.
15. Fika F, Mitrouli M, Turec O. On the estimation of $x^T A^{-1} x$ for symmetric matrices. *Electronic Journal of Linear Algebra*. 2021;37: 549–561. DOI:10.13001/ela.2021.5611.

AUTHORS

Igor A. Klypin

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Geodesy, Faculty of Geodesy

PhD in Engineering;

Center of Geodesy, Cartography and SDI, Moscow, Russia

 0000-0002-6164-566

Anastasia A. Alekseeva

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Faculty of Geodesy;

JSC Metrogiprotrans, Moscow, Russia

 0000-0001-8953-9851

Submitted: May 29, 2023. Accepted: June 23, 2023. Published: June 30, 2023.