

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРАТЧАЙШЕГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ РАЗНОРОДНОЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ

П. К. БУРЯКОВСКИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены методы для определения кратчайшего расстояния между объектами однородной геопространственной геометрии. Предложен подход к определению кратчайшего расстояния между объектами разнородной геопространственной геометрии. Данный подход основан на преобразовании любых геопространственных объектов к набору пространственных точек и, следовательно, к решению базовой задачи поиска ближайшей точки. Ожидается, что предлагаемый подход позволит повысить эффективность геостатистической обработки данных при решении прикладных задач.

Ключевые слова: геоинформационные системы; геопространственные данные; кратчайшее расстояние; разнородная геометрия; большой круг; сферическое расстояние; сферическая теорема косинусов; формула гаверсинуса; евклидово расстояние; дискретизация.

ВВЕДЕНИЕ

Географические информационные системы (ГИС) – это программные средства, которые позволяют собирать, хранить, обрабатывать, анализировать и визуализировать географические данные [1].

ГИС состоят из различных компонентов, включая базу данных, систему координат, картографические данные, аналитические инструменты и пользовательский интерфейс. База данных содержит информацию о таких географических объектах, как здания, дороги, реки, озера и др. Система координат определяет местоположение объектов на карте. Картографические данные представляют собой графическое изображение географических объектов. Аналитические инструменты позволяют проводить анализ данных, например, определять расстояния между объектами, находить оптимальные маршруты и т. д. Пользовательский интерфейс позволяет пользователям взаимодействовать с ГИС и получать информацию о географических объектах.

В целом ГИС являются мощным инструментом для работы с геопространственными данными и позволяют получать ценную информацию о мире вокруг нас.

В современном мире геопространственные данные играют важную роль в различных областях, таких как география, геология, экология, транспорт и многие другие [2]. По сути, пространственные данные можно определить как данные о географических объектах или явлениях, фиксирующие их местоположение и/или распределение в системе координат, привязанной к телу Земли или любого другого небесного тела. Таким образом, отличительной особенностью пространственных данных перед непространственными является координатное описание местоположения. Геопространственные данные используются для различных целей, таких как планирование городской инфраструктуры, управление природными ресурсами, мониторинг изменений в окружающей среде, прогнозирование погоды, анализ рынка недвижимости и т. д. Они также используются в научных исследованиях, чтобы изучать природные явления и процессы [3].

Примером применения геопространственных данных в научных исследованиях является веб-ориентированная ГИС прогноза полярных сияний Aurora Forecast (рисунок 1). Данное веб-приложение свободно доступно по URL <http://aurora-forecast.ru> [4–6]. Она обеспечивает краткосрочный прогноз интенсивности сияний в режиме реального времени. По интенсивности

сияния можно судить об области экстремальных геомагнитных возмущений Арктического региона. Они, в свою очередь, влияют на инфраструктуру Арктической зоны РФ. Например, могут вызывать помехи навигационных систем, на линиях коротковолновой радиосвязи, приводить к сбоям на высокоширотной железной дороге. На основе данных системы можно спрогнозировать подобные явления и соответственно минимизировать риски.

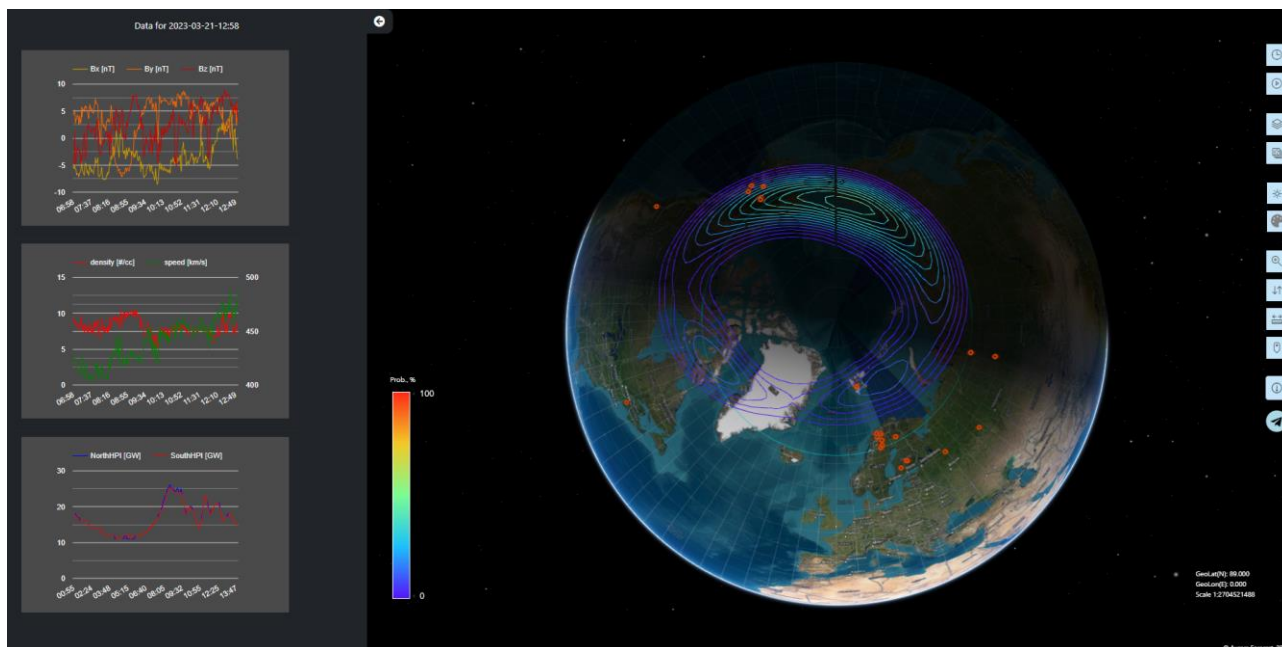


Рис. 1 Веб-ориентированная геоинформационная система Aurora Forecast.

Одним из ключевых вопросов в анализе геопространственных данных является определение кратчайшего расстояния между объектами разнородной геометрии. Это может быть расстояние между точками, линиями или полигонами на поверхности Земли.

Существуют множество методов для определения кратчайшего расстояния между объектами, но большинство из них предназначены для объектов однородной геопространственной геометрии. В работе предлагается новый подход, который позволяет определять кратчайшее расстояние между объектами различных форм, таких как точки, линии и полигоны.

ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО РАССТОЯНИЯ

Существуют несколько методов определения кратчайшего расстояния между объектами однородной геопространственной геометрии. Самый распространенный способ – измерение евклидова расстояния по прямой между двумя точками на декартовой плоскости (рисунок 2), рассчитываемого по формуле:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

где x_1 и x_2 – абсциссы двух точек, а y_1 и y_2 – их ординаты.



Рис. 2 Евклидово расстояние.

При поиске кратчайшего расстояния в городе применяется манхэттенское расстояние (рисунок 3):

$$d = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|.$$

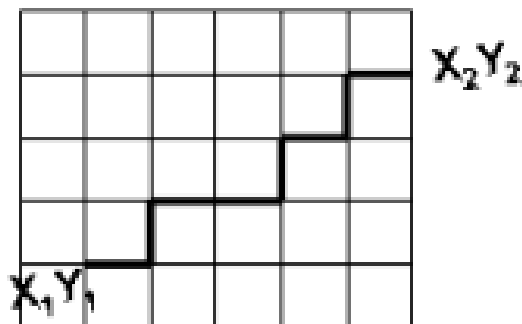


Рис. 3 Манхэттенское расстояние.

Однако если координаты точек измерены на поверхности Земли, то приведенные выше формулы не дают правильного расстояния между точками, так как не учитывают кривизну поверхности. В этом случае кратчайшее расстояние измеряется по дуге большой окружности, проходящей через две точки. Такой метод принято называть вычислением длины дуги большого круга [7].

Через любые две точки на поверхности сферы, если они не прямо противоположны друг другу (то есть не являются антиподами), можно провести уникальный большой круг. При этом две точки будут разделять большой круг на две дуги – короткую и длинную. Длина короткой дуги большого круга называется ортодромией и является кратчайшим расстоянием между двумя точками, находящимися на поверхности сферы (рисунок 4).

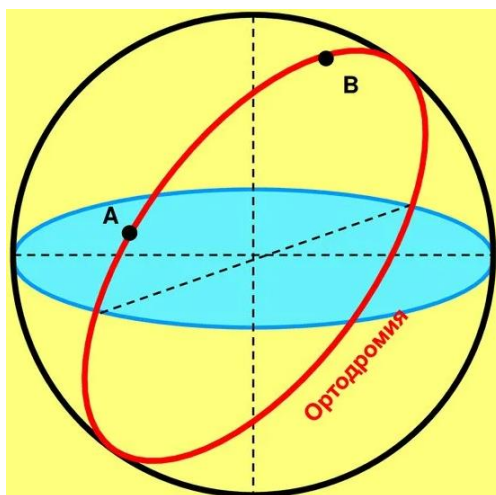


Рис. 4 Определение кратчайшего пути на поверхности сферы.

Существуют три способа расчета сферического расстояния большого круга:

1. Сферическая теорема косинусов.

Если положение точки определяется широтой, или углом с плоскостью экватора (ϕ), и долготой, или углом между меридианом, проходящим через точку, и нулевым меридианом (λ), то длина дуги большой окружности α (угол) между двумя точками определяется по формуле

$$\Delta\sigma = \arccos\{\sin\phi_1 \sin\phi_2 + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \cos\Delta\lambda\},$$

где ϕ_1, ϕ_2 – координаты двух точек по широте в радианах, $\Delta\lambda$ – разница координат по долготе, $\Delta\sigma$ – угловая разница.

Для перевода углового расстояния в метрическое нужно угловую разницу умножить на радиус Земли k . Единицы конечного расстояния будут равны единицам, в которых выражен радиус.

Таким образом, расстояние между двумя точками будет определено как

$$d = \Delta\sigma \times k.$$

Использование данной формулы в случае маленьких расстояний может приводить к значительным ошибкам, связанным с округлением. Чтобы избежать проблем с небольшими расстояниями, используется формула гаверсинуса.

2. Формула гаверсинуса:

$$\Delta\sigma = 2 \arcsin \left\{ \sqrt{\sin^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)} \right\}.$$

Формула гаверсинуса также подвержена проблеме точек-антиподов. Чтобы ее решить, используется следующая модификация.

3. Модификация формулы гаверсинуса для антиподов:

$$\Delta\sigma = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{[\cos\phi_2 \sin\Delta\lambda]^2 + [\cos\phi_1 \sin\phi_2 - \sin\phi_1 \cos\phi_2 \cos\Delta\lambda]^2}}{\sin\phi_1 \sin\phi_2 + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \cos\Delta\lambda} \right\}.$$

ПРОБЛЕМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

При определении кратчайшего расстояния между объектами в ГИС можно столкнуться с рядом проблем и ограничений.

Кривизна Земли. Кратчайшее расстояние между двумя объектами на поверхности Земли зависит от кривизны Земли, поэтому необходимо учитывать этот фактор при расчете расстояний.

Сложность алгоритмов вычислений. Расчет кратчайшего расстояния может быть очень сложным и требовать больших вычислительных ресурсов, особенно при большом количестве объектов.

Необходимость оптимизации. В некоторых случаях может потребоваться оптимизировать расчет кратчайшего расстояния с целью уменьшения времени выполнения или использования ресурсов.

Неоднородность данных. Данные о расстоянии между объектами могут быть представлены в разных форматах, например, в метрах, километрах, милях и т. д. Это может привести к неоднородности данных и ошибкам при расчете расстояний.

Точность данных. Кратчайшее расстояние может быть определено только на основе данных, которые имеют достаточную точность. Ошибки в данных могут привести к неточным результатам расчета расстояний.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРАТЧАЙШЕГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ РАЗНОРОДНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Большинство пространственных баз данных позволяют представлять геопространственные объекты в виде линейно связанных и несвязанных двумерных геометрий. Такие базы также называют векторными моделями данных или цифровыми представлениями точечных, линейных и полигональных пространственных объектов в виде набора координатных пар,

с описанием только геометрии объектов. Стандарт *Simple Features* включает в себя 17 геометрий хранения [8]. Из них наиболее используемыми являются точки, линии, полигоны и многогранники. Примеры различных видов геометрий представлены на рисунке 5.

При построении векторных изображений создается целостный вид геопространственных объектов путем соединения точек линиями, дугами или полилиниями. Поэтому векторную модель называют объектной. Векторные изображения занимают значительно меньше памяти при хранении, чем растровые, требуют меньше затрат времени на обработку, а сами алгоритмы обработки, как правило, более просты. Базовым примитивом векторных моделей ГИС является точка. Через понятие «точка» определяются все остальные объекты векторной модели.

Точки (point) образуют нульмерную геометрию. Линии – пространственные точки, соединенные прямыми отрезками и образующие одномерную геометрию. Полигон – это двумерная геометрия с положительной площадью, образованная последовательными точками, отрезки между которыми образуют замкнутое кольцо.

Измерения длин объектов различно при использовании растровых и векторных моделей данных. Определение длины вертикальных или горизонтальных линий в растре проводится подсчетом числа ячеек, через которые линия проходит, и умножением его на линейный размер одной ячейки раstra. Недостатком измерения длины в растре на примере разнородной геопространственной геометрии может служить содержание кривого участка в пределах одной ячейки раstra. Определение расстояния в векторной системе гораздо более точно, чем подсчет ячеек раstra. В векторной системе для каждого отрезка из образующих линию система хранит координаты крайних точек, из которых может быть получено расстояние. Однако нужно понимать, что в векторном представлении объектов кривые участки аппроксимируются прямыми отрезками, и в зависимости от длин отрезков может различаться точность расчетов [9, 10]. Поэтому для определения кратчайшего расстояния между объектами разнородной геопространственной геометрии необходимо свести объекты к набору пространственных точек. Это необходимо для того, чтобы в результате решать базовую задачу поиска ближайшей точки.

Свести геопространственные объекты к набору пространственных точек можно с помощью метода дискретизации. Дискретизация заключается в разбиении геометрической фигуры на конечное число точек. Чем больше дискретизация, тем точнее расчет. В результате дискретизации объекты разного типа будут иметь общий формат представления в виде набора пространственных точек, что позволит определить кратчайшее расстояние.

На рисунке 6 приведен пример преобразования полигона к набору пространственных точек с помощью метода дискретизации. Как можно видеть из рисунка, полигон, состоящий из узловых точек, получилось разбить с добавлением множества дополнительных пространственных точек.

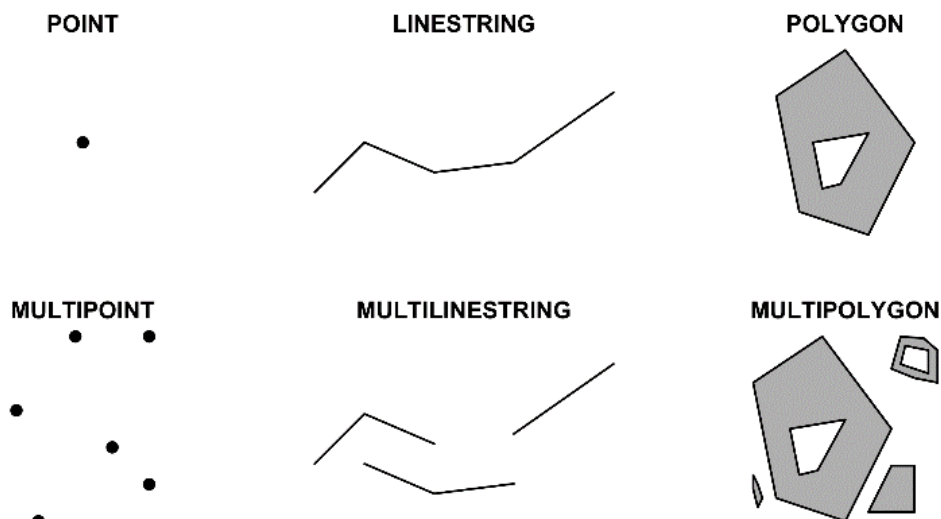


Рис. 5 Различные виды геометрий.

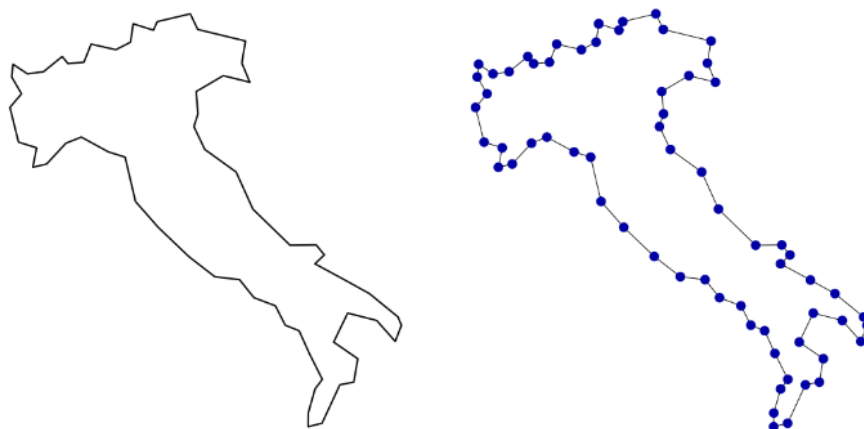


Рис. 6 Пример преобразования полигона к набору пространственных точек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к определению кратчайшего расстояния между объектами разнородной геопространственной геометрии, основанный на сведении любых геопространственных объектов к набору пространственных точек, позволяет решать задачу поиска ближайшей точки между различными объектами. Данный подход может быть использован в различных областях, где требуется определение кратчайшего расстояния между объектами разнородной геометрии, таких как геодезия, картография, геология, экология и другие.

БЛАГОДАРНОСТИ И ПОДДЕРЖКА

Автор выражает благодарность профессору кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского университета науки и технологий Г. Р. Воробьевой за высказанные замечания и пожелания по улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баранов Ю. Б., Берлянт А. М., Капралов Е. Г., Кошкарёв А. В., Серапинас Б. Б., Филиппов Ю. А. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. М.: ГИС-Ассоциация, 1999. [[Yu. B. Baranov, A. M. Berlyant, E. G. Kapralov, A. V. Koshkarev, B. B. Serapinas, Yu. A. Filippov, Geo-informatics. Explanatory Dictionary of Basic Terms, (in Russian). Moscow: GIS Assotiation, 1999.]]
2. Брекоткина Е. С., Павлов С. В., Трубин В. Д., Христовуло О. И. Управление проектом создания сложной геоинформационной системы на основе специализированного справочника // Системная инженерия и информационные технологии. 2021. Т. 3. № 2(6). С. 66-73. DOI 10.54708/26585014_2021_32666. [[(In Russian).]]
3. Аюнова О. Д., Чупикова С. А., Мамаш Е. А. Опыт применения ГИС в решении задач научных исследований // Вестник Тывинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2014. № 2. С. 91–99. [[O. D. Ayunova, S. A. Chupikova, and E. A. Mamash, "Experience of GIS application in solving scientific research tasks" (in Russian) // Vestnik TuvGU, no. 2, pp. 91-99, 2014.]]
4. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Подход к обнаружению и устранению артефактов пространственных изолиний в приложениях Веб-ГИС // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 1. С. 126–136. [[A. V. Vorobev, G. R. Vorobeva, "An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in Web GIS applications" (in Russian) // Computer Optics, vol. 47, no. 1, pp. 126-136, 2023.]]
5. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Krasnoperov R. I., Vorobeva G. R., Lorentzen D. A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the "virtual globe" technology // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. Vol. 20. No. 6. Pp. E56001-6001. DOI 10.2205/2020ES000721.
6. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Еникеев Т. А., Воробьева Г. Р., Христовуло О. И. Система динамической визуализации геомагнитных возмущений по данным наземных магнитных станций // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 1. С. 162–176. DOI 10.26583/sv.13.1.11. [[A. V. Vorobev, V. A. Pilipenko, T. A. Enikeev, G. R. Vorobeva, O. I. Khristodulo. "System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances according to the data of ground magnetic stations" (2021) // Scientific Visualization 13.1: 162 - 176, DOI: 10.26583/sv.13.1.11 (In Russian).]]

7. Дубинин М. Вычисление расстояния и начального азимута между двумя точками на сфере [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/qa/great-circles.html> (дата обращения: 10.03.2023). [[М. Dubinin. (2023, Mar. 10). Calculating the Distance and Initial Azimuth between Two Points on a Sphere [Online], (in Russian). Available: <https://gis-lab.info/qa/great-circles.html>]]

8. Самсонов Т. Е. Пространственные данные [Электронный ресурс]. URL: https://tsamsonov.github.io/r-geo-course/spatial.html#simple_features (дата обращения: 12.03.2023). [[Т. Е. Samsonov. (2023, Mar. 12). Spatial Data [Online], (in Russian). Available: https://tsamsonov.github.io/r-geo-course/spatial.html#simple_features]]

9. Воробьева Г. Р. Методологические основы обработки неоднородной пространственно-временной информации в системах поддержки принятия решений на основе технологий больших данных (на примере геомагнитных данных) // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 3 (12). С. 3–26. [[Vorobyova G. R. “Methodological foundations for processing heterogeneous spatio-temporal information in decision support systems based on big data technologies (using the example of geomagnetic data)” // System Engineering and Information Technologies. 2023. Vol. 5, No. 3 (12), pp. 3–26. (In Russian).]]

10. Воробьев А. В. Методологические основы обработки пространственной информации для поддержки принятия решений на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных) // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 4 (13). С. 3–27. [[Vorobyov A. V. “Methodological foundations for processing spatial information to support decision-making based on aggregated digital twins (using the example of high-latitude geomagnetic data)” // System Engineering and Information Technologies. 2023. Vol. 5, No. 4 (13), pp. 3-27. (In Russian).]]

Поступила в редакцию 27 сентября 2023 г.

МЕТАДАННЫЕ / METADATA

Title: An approach to determining the shortest distance between objects of heterogeneous spatial geometry.

Abstract: This study investigates methods for determining the shortest distance between objects of homogeneous geospatial geometry. The author proposes an approach to determining the shortest distance between objects of homogeneous geospatial geometry. This approach is based on the transformation of any geospatial objects to a set of spatial points and hence a solution of the basic problem of searching the nearest point. It is expected that the proposed approach will improve the geostatic data processing efficiency in the solution of application tasks.

Key words: geoinformation systems; geospatial data; shortest distance; heterogeneous geometry; great circle; spherical distance; spherical cosine theorem; the haversine formula; Euclidean distance; discretization.

Язык статьи / Language: русский / Russian.

Об авторе / About the author:

БУРЯКОВСКИЙ Павел Кириллович

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия.
Магистрант кафедры вычислительной математики и кибернетики. Готовит дис. о подходе к определению кратчайшего расстояния между объектами разнородной геопространственной геометрии.

E-mail: buryakovsky.pavel@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5123-3859>

BURYAKOVSKY Pavel Kirillovich

Ufa University of Science and Technologies, Russia.
Student, Dept. of Computational Mathematics and Cybernetics.
He is preparing a dissertation on an approach to determining the shortest distance between objects of heterogeneous geospatial geometry.

E-mail: buryakovsky.pavel@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5123-3859>