

Геоинформационная система для оценки взаимного расположения векторных пространственных объектов

Г.Р. Воробьева¹, А.В. Воробьев¹

¹ Уфимский университет науки и технологий; 450000, Россия, г. Уфа, ул. З. Валиди, д. 32

Аннотация

Предложен новый подход (метод и алгоритм) к оценке взаимного расположения векторных геопространственных объектов произвольной геометрии в геоинформационных решениях. Основой подхода является концепция пространственных доменов и интерполяции значений атрибутивных параметров, что в совокупности позволяет анализировать пересечения даже для геопространственных объектов с нерегулярной и разреженной структурой, таких как изолинии и точечные слои. Для формализации подхода предложена математическая модель, характеризующая процесс формирования промежуточных геопространственных примитивов и оценки их атрибутов с использованием интерполяции. Для оценки работоспособности предложенного решения разработан исследовательский прототип веб-приложения на базе Python и GeoPandas. Проведенные вычислительные эксперименты показали эффективность применения предложенного подхода как в контексте точности соответствующих значений, так и с точки зрения производительности итогового веб-приложения.

Ключевые слова: геоинформационные системы, пространственный анализ, векторные данные, вычислительная геометрия, интерполяция, алгоритмы обработки изображений.

Цитирование: Воробьева, Г.Р. Геоинформационная система для оценки взаимного расположения векторных пространственных объектов / Г.Р. Воробьева, А.В. Воробьев // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 3. – 1714. – doi:10.18287/COJ1714.

Citation: Vorobeva GR, Vorobev AV. Geoinformation system for assessing spatial relationships of vector objects with arbitrary geometry. Computer Optics 2026; 50(3): 1714. doi:10.18287/COJ1714.

Введение

Современные геоинформационные технологии и системы являются важнейшим инструментом для обработки и анализа геопространственной информации об объектах, процессах и явлениях различной природы происхождения. Интерполяция, прямое и обратное геокодирование, визуализация с применением комбинаций геопространственных примитивов – лишь небольшой перечень задач, решаемых в настоящее время с помощью геоинформационных технологий.

Основная проблема, рассматриваемая в работе, заключается в методологической ограниченности существующих подходов к анализу взаимодействия объектов, представленных разреженными и нерегулярными пространственными структурами. Традиционные методы анализа пересечений, реализованные в современных ГИС [1,4], эффективны лишь для объектов с четко выраженными границами и сплошной геометрией. Однако в случаях, когда объекты представлены дискретными примитивами, прямое применение этих методов либо невозможно, либо приводит к значительным погрешностям.

При анализе пространственных взаимодействий критически важным является учет двух принципиально разных типов данных: пространственных (координаты, форма и взаимное расположение объектов) и атрибутивных (параметры, связанные с этими объектами). Пространственные данные определяют геометрию взаимодействия, в то время как атрибутивные – содержательную интерпретацию результатов этого взаимодействия. В большинстве задач, таких как анализ рисков или оценка воздействий, именно корректный учет взаимосвязи пространственных и атрибутивных характеристик обеспечивает содержательную ценность получаемых результатов [12–14].

Особую актуальность эта проблема приобретает при решении задач, требующих определения атрибутивных характеристик в точках, где отсутствует явное пересечение анализируемых объектов. Типичным примером является задача оценки вероятности наблюдения полярного сияния вдоль траектории спутника, проходящей через зону аврорального овала, представленного набором изолиний [20]. Аналогичная проблема возникает при определении глубины затопления вдоль маршрута судна в зоне с нерегулярным распределением этого параметра (рис. 1).

Известные подходы позволяют частично решить задачу оценки взаимного расположения геопространственных объектов. Однако такое решение эффективно только в тех случаях, когда имеет место пересечение геопространственных объектов, которые, помимо контуров, имеют еще и сетку соответствующей формы, заполненную примитивами или представляющую собой некоторую сплошную поверхность.

Под «сеткой соответствующей формы» понимается регулярная или нерегулярная пространственная структура, дополняющая исходные контуры объекта и позволяющая интерполировать атрибутивные значения в

областях между примитивами. Например, для полигона, описывающего зону затопления, такая сетка может представлять собой совокупность ячеек с рассчитанными значениями глубины воды (рис. 1). Сетка выступает математической моделью, «заполняющей» пространство между контурами данными, что важно для задач интерполяции или анализа градиентов. Однако ее построение для объектов с разреженной или сложной геометрией требует значительных вычислительных затрат и часто приводит к избыточной дискретизации, что снижает эффективность решения.

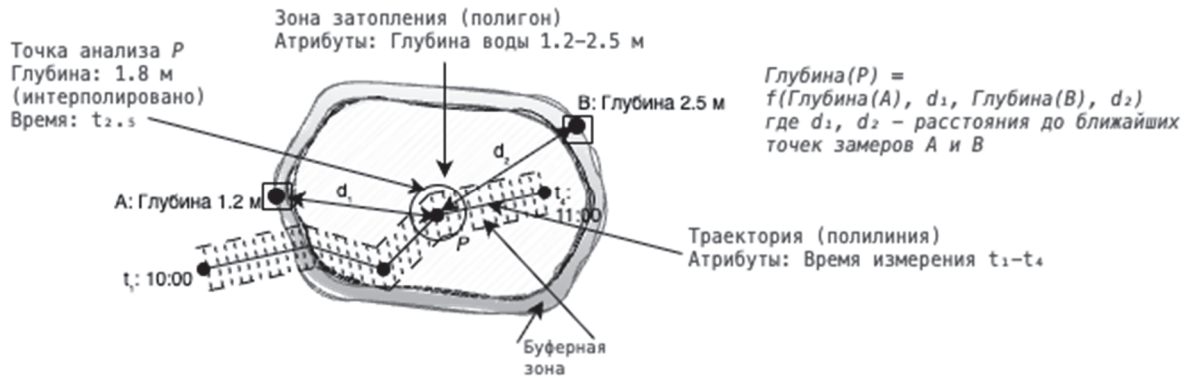


Рис. 1. Обобщенная схема оценки пересечения разнородных геопространственных объектов с интерполяцией атрибутов

В действительности нередки ситуации, когда представить визуально некоторый геопространственный объект в виде сплошной поверхности невозможно: например, когда для описания объекта/процесса используется группа разнесенных между собой в пространстве линий. Очевидным решением такой ситуации является подбор сплошной поверхности, максимально покрывающей соответствующий геопространственный объект. Однако здесь следует иметь в виду, что искомая поверхность ввиду пространственной неоднородности оригинального геопространственного объекта может представлять собой пространственную сетку, покрывающую все или значительную часть земной поверхности. С точки зрения производительности и точности решения данный подход представляется малоэффективным. В этой связи требуется метод, исключающий необходимость сплошной сетки для анализа пересечений разнородных объектов

1. Постановка и формализация задачи

В рамках данной работы термины «геопространственное изображение» и «векторный пространственный объект» используются как синонимы, обозначающие совокупность векторных примитивов с привязанными атрибутивными параметрами.

Рассмотрим два произвольных геопространственных изображения A и B , каждое из которых представляет собой совокупность N и M геопространственных примитивов соответственно:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}; B = \{b_1, b_2, \dots, b_M\}, \quad (1)$$

где a_i, b_i – геопространственные примитивы, входящие в геопространственные изображения A и B .

Здесь и далее будем рассматривать геопространственные изображения A и B как геопространственные векторные слои, в которых составляющие их геопространственные примитивы позиционно не совпадают:

$$\nexists a_i, b_j: a_i \in A, b_j \in B, a_i = b_j, \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M. \quad (2)$$

Для устранения терминологической неоднозначности далее в работе все формы пространственных связей объединяются под термином пространственное взаимодействие.

Каждому геопространственному примитиву соответствует один или несколько атрибутивных параметров с заданными значениями:

$$a_i \rightarrow (x_1, x_2, \dots, x_K), b_i \rightarrow (y_1, y_2, \dots, y_K): \\ a_i \in A, b_j \in B, a_i = b_j, i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M. \quad (3)$$

Выражение (3) описывает базовое соответствие между геопространственными примитивами и их атрибутами для общего случая. Здесь a_i и b_i представляют простые контейнеры атрибутов без учета геометрических характеристик.

Суррогатная окрестность (или буферная зона) – это вспомогательная геометрическая конструкция, создаваемая вокруг исходного примитива для анализа пространственных отношений. Такие окрестности позволяют учитывать атрибутивные характеристики при анализе пересечений, преобразуя их в пространственные домены.

Составляющим слою A и B геопространственным примитивам может быть поставлена в соответствие некоторая суррогатная окрестность заданного радиуса R . Фактически представляется возможным описать подобную структуру в качестве пространственной окрестности по форме, симметрично повторяющей исходный примитив и располагающийся на равном удалении от его контуров. Так, в частности, для геопространственной полилинии соответствующая окрестность может быть получена равномерным смещением дубликатов примитива по оси x или y относительно оригинала на расстояние R и формированием (при необходимости) дополнительных полилиний, соединяющих одноименные концы полилиний:

$$\begin{aligned} l &= \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}; \\ l' &= \{(x'_1, y'_1), \dots, (x'_n, y'_n)\}; \\ l'' &= \{(x''_1, y''_1), \dots, (x''_n, y''_n)\}; \\ \|(x_1, y_1), (x'_1, y'_1)\| &= \|(x_1, y_1), (x''_1, y''_1)\| = R; \\ \|(x_n, y_n), (x'_n, y'_n)\| &= \|(x_n, y_n), (x''_n, y''_n)\| = R; \\ l'_x &= \{(x'_1, y'_1), (x''_1, y''_1)\}; \\ l''_x &= \{(x'_n, y'_n), (x''_n, y''_n)\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где n – количество точек, составляющих звенья полилинии, l – оригинальная полилиния, l' и l'' – дубликаты полилинии l ; R – расстояние смещения; $\|(x_i, y_i), (x_j, y_j)\|$ – расстояние между точками (x_i, y_i) и (x_j, y_j) ; l'_x, l''_x – дополнительные однозвенные полилинии, соединяющие крайние точки полилиний-дубликатов l' и l'' .

Механизм формирования суррогатных окрестностей для различных типов примитивов можно продемонстрировать на примере полилинии. Исходная линия $l = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ дополняется двумя параллельными копиями (l' и l''), смещенными на расстояние R по нормали к исходной линии. Крайние точки соединяются дополнительными отрезками (l'_x и l''_x) для образования замкнутого контура.

При этом необходимо обозначить контур, определяющий пространственные границы каждого составляющего слой примитива. Отметим, что возможно выделение контура всего геопространственного слоя как совокупности внешних контуров составляющих его примитивов. Однако в большинстве случаев при решении практических задач формирование подобного контура представляется неэффективным, поскольку пространственный слой, проходящий через неравномерно распределенные геопространственные примитивы, может охватывать значительную часть земной поверхности, включая те участки, где отсутствуют как непосредственно атрибутивные и пространственные данные, так и сопровождающие их окрестности.

Для геопространственного слоя A обозначим каждый геопространственный объект X с его окрестностью X' некоторым замкнутым множеством. Предполагая множественные точки и/или регионы взаимодействия пространственных слоев A и B , каждая итерация пересечения будет определяться взаимодействием разнослойных объектов (с окрестностями):

$$\begin{aligned} A &= \{a_1, a_2, \dots, a_N\}; B = \{b_1, b_2, \dots, b_M\}; \\ A \cap B: \exists a_i &= X_i \cup X'_i; b_j = Y_j \cup Y'_j; a_i \cap b_j \neq \emptyset. \end{aligned} \quad (5)$$

Атрибутивные параметры в зонах взаимодействия рассчитываются через взвешенную интерполяцию значений исходных примитивов, где весовые коэффициенты определяются расстоянием до границ соответствующих суррогатных окрестностей. Это позволяет согласовать пространственные координаты с разнородными атрибутивными характеристиками в единой метрике анализа.

Таким образом, задача определения взаимодействия двух геопространственных слоев на уровне составляющих их геопространственных примитивов в общем случае сводится к определению областей и/или точек пересечения ближайших друг к другу (в том числе по окрестностям) геопространственных компонент различной геометрии.

2. Состояние вопроса

Задача оценки взаимного расположения геопространственных слоев известна и в общем виде частично решается с помощью известных подходов. Так, наибольшее распространение получили инструменты ArcGIS для анализа пересечений [1, 4].

Известен подход, предполагающий определение взаимного расположения пространственных слоев посредством масштабирования растрового изображения с применением так называемой суперпиксельной сегментации [1]. Подход использует метод «кросслойных пространственных плиток», предполагающий разделение географических объектов, формирование правил рендеринга согласованности, масштабирование и вывод данных с сегментацией суперпикселей [1].

Другое практикуемое в настоящее время решение предполагает применение метода пространственной идентификации пересечений полигональных пространственных объектов геопространственных наборов данных путем обнаружения совпадающих пар объектов из двух разных наборов данных с использованием мер их пространственного перекрытия и сходства их морфометрических характеристик (периметр, площадь, отношение ширины к длине, блочность, количество вершин) [2]. Данный подход при этом не ориентирован на семантическую оценку соответствующих геопространственных объектов в контексте значений их атрибутивных параметров.

В [3, 4] обсуждаются также подходы, основанные на методах вычислительной геометрии. Основные решения в данном контексте включают использование уравнений линий, элементов аналитической геометрии и сопутствующих алгоритмов для определения искоемых пересечений. Кроме того, используются методы, основанные на операциях над векторами. В частности, рассматривается применение алгоритма Бентли – Оттмана [5] для поиска всех пересечений для заданного набора линий. Указанный алгоритм эффективен в том числе и для данных большого объема, однако характеризуется, наряду с другими описанными методами, высокой вычислительной стоимостью.

На большом объеме геоданных для оценки взаимного расположения геопространственных примитивов хорошо зарекомендовал себя алгоритм для обнаружения пересечений линейных сегментов, основанный на комбинации R-деревьев и метода плоскостного заметания (plane sweep) [6, 7]. Метод характеризуется высокой производительностью при работе с большими объемами данных, однако требует предварительной индексации данных.

Отметим также подход, основанный на применении топологических методов для поиска пересечений геопространственных объектов [8]. Указанный метод активно используется для работы с потоковыми геопространственными данными и задействует в том числе методы инкрементальной обработки. Подход характеризуется высокой производительностью при реализации, однако обеспечивает приемлемую погрешность только для масштабных пространственных объектов с явно выраженными пересечениями.

Перечисленные подходы и методы демонстрируют возможности применения при решении задач определения областей пересечения геопространственных объектов. Однако проведенный анализ показал, что такое использование представляется в определенной степени ограниченным. Главным фактором данной ограниченности выступает специфическая геометрия анализируемых геопространственных объектов.

Так, основной акцент делается на пересечение объектов, описываемых и визуализируемых в виде сплошной поверхности соответствующих геопространственных примитивов. В частности, в подавляющем большинстве случаев речь идет о поиске пересечений объектов, заданных мультиточечными геопространственными полилиниями. Во многих ситуациях искомые точки и/или области пересечения могут быть идентифицированы в том числе визуально: предлагаемые модели, методы и алгоритмы призваны в большей степени упростить и ускорить работу пользователя, а также подтвердить сделанные им по геопространственным визуализациям выводы.

Вместе с тем в настоящей работе рассматривается несколько отличная от представленных примеров задача, которая в первом приближении может быть идентифицирована как частный случай обозначенных задач. Необходимо определить пространственные точки и/или области пересечения пространственных объектов, из которых как минимум один описывается дискретным геопространственным примитивом. Чем больше объектов, заданных указанным образом, тем менее очевидным становится поиск искоемых пространственных пересечений.

В качестве примера представляется целесообразным рассмотреть и в дальнейшем продемонстрировать предлагаемые решения на его основе задачу определения позиционных и атрибутивных данных, характеризующих пересечение набора распределенных замкнутых пространственных полилиний и набора пространственных точек, выстроенных в ряд с заданным шагом.

3. Описание предлагаемого подхода

В основе предлагаемого подхода к оценке взаимного расположения геопространственных объектов лежит идея дополнения пространства между соседними объектами одного геопространственного слоя аналогичными примитивами-копиями до сплошной геопространственной фигуры. Примитивы-копии наследуют от соответствующего родительского объекта атрибутивные параметры, а изменение пространственных (локационных) данных осуществляется посредством изменения значений пар географических координат на заданную величину шага.

В рамках предлагаемого подхода соседние геопространственные объекты определяются через анализ взаимного расположения с учетом их пространственных характеристик (рис. 2). Для точечных данных соседство устанавливается при расстоянии между объектами, не превышающем заданный порог, где расстояние рассчитывается как дуга большого круга – кратчайший путь между точками на поверхности сферы, что особенно актуально для глобальных геопространственных задач. Для линейных и полигональных объектов сначала определяются их геометрические центры (центроиды), после чего анализируется взаимное расположение этих центров и проверяется пересечение буферных зон вокруг объектов. Критерий соседства включает как минимальное расстояние между центрами, так и параметрический коэффициент, учитывающий характерный размер объектов.

Практическая реализация предполагает разные методы обработки для каждого типа данных: для точек используется прямой расчет расстояний, для линий – аппроксимация наборами точек с последующим анализом минимальных расстояний между отрезками, а для полигонов дополнительно учитывается пересечение их буферных зон. Этот комплексный подход позволяет унифицировать определение соседства для разнородных геопространственных данных, обеспечивая физически корректную пространственную метрику и практическую применимость в ГИС-системах, что решает проблему неопределенности при работе с разреженными и разнотипными векторными объектами.

Конкретизируя предложенный подход, выделим основные этапы его реализации (рис. 3):

– построение буферных зон вокруг примитивов;

- заполнение промежутков интерполированными копиями;
- анализ топологических пересечений с учетом атрибутов.

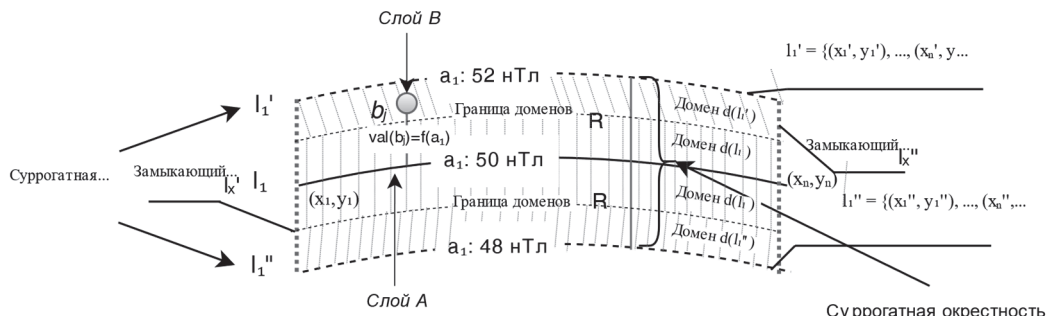


Рис. 2. Схема пространственных доменов и суррогатных окрестностей

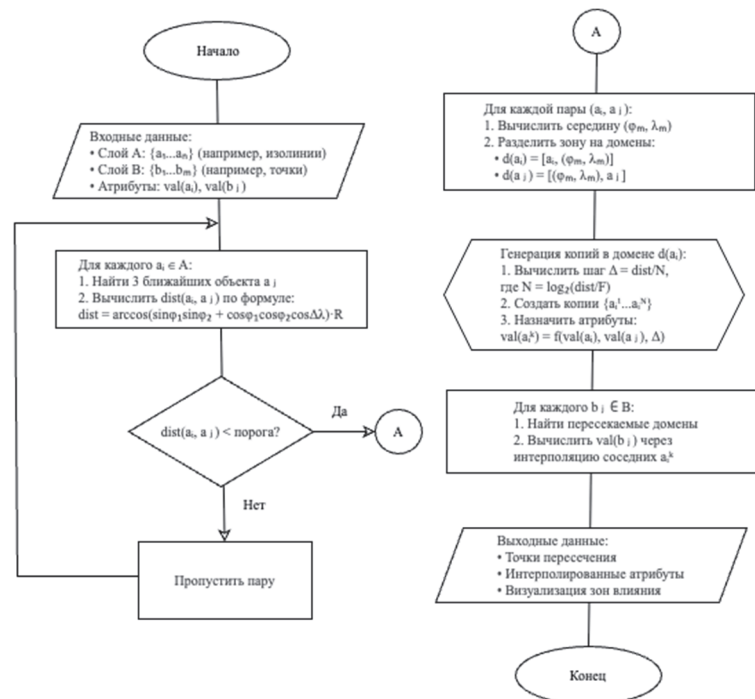


Рис. 3. Алгоритм оценки пространственных пересечений для разреженных векторных данных

В дальнейшем изложении под «пространственным взаимодействием» понимается любая форма связи между векторными объектами, включая топологическое пересечение, нахождение в заданной буферной зоне, атрибутивную корреляцию в зонах влияния.

Так, к примеру, пусть имеется совокупность разделенных в пространстве геопространственных полилиний, характеризующих линии уровня, которые описывают пространственное распределение некоторого атрибутивного параметра. Пространство между двумя соседними пространственными полилиниями (изолиниями в данном случае) не содержит связанных с ними геопространственных примитивов и не имеет атрибутивной привязки. По сути в общем случае имеет место некоторая геопространственная область, ограниченная с двух сторон соответствующими геопространственными полилиниями. Задача сводится к достраиванию областей таким образом, чтобы заполнить неинформативное пространство с присвоением соответствующей атрибутивной нагрузки.

В простейшем случае предлагаемое решение может быть сформулировано следующим образом. Необходимо зафиксировать имеющуюся пару геопространственных полилиний таким образом, чтобы определить величину разделяющего их расстояния, определяемого в соответствии с соотношениями большого круга (Great Circle [9–11]). Далее необходимо определить промежуточные пространственные точки, разделяющие указанное пространство примерно на равные части. Далее в каждой образованной точке необходимо провести полилинию, копирующую исходную.

Отметим, что в общем случае форма полилиний в одной паре может отличаться, и возникает вопрос определения того, какую именно из полилиний копировать. Дополнительно определим середину пространственной прямой, условно соединяющей пары полилиний. Паттерн для создания новой полилинии будет определен на основании близости соответствующей промежуточной точки к одной из пары пространственных изолиний относительно выделенной пространственной точки-середины промежутка.

Фактически имеет место разделение не покрытого пространственными примитивами и не имеющего атрибутивной ценности пространства на две приблизительно равные части. Формирование новой пространственной полилинии будет определяться ее принадлежностью подобласти, которую представляется целесообразным обозначить пространственным доменом.

Здесь и далее под пространственным доменом будем понимать некоторую пространственную область, в которой должны с заданным шагом дискретизации быть созданы копии оригинального геопространственного примитива. Каждый домен принадлежит определенному геопространственному примитиву с собственными позиционными и атрибутивными характеристиками. Во избежание возможных коллизий необходимо обеспечить невозможность пересечения пространственных доменов, что позволит однозначно поставить каждому из них в соответствие один и только один геопространственный примитив.

Создание копии геопространственного примитива предполагает формирование нового геопространственного примитива того же типа с теми же атрибутивными параметрами и соответствующими им значениями. При этом позиционные характеристики формируемых объектов отличаются от аналогичных параметров оригинального объекта на заданный шаг дискретизации, определяемый эмпирически.

Фактически на высоком уровне абстракции предлагаемое решение предполагает не формирование некоторой сплошной геопространственной области произвольной геометрии, а в большей степени подразумевается заполнение имеющегося между геопространственными примитивами пространства синтезированными копиями с соответствующими атрибутивными значениями. При необходимости крайние (с точки зрения распределения вдоль соответствующих географических широт и/или долгот) могут быть последовательно соединены между собой. С практической точки зрения такое решение не представляется уместным, однако его можно использовать для более информативной визуализации пространственных данных.

Пространственный домен здесь понимается как зона влияния геопространственного примитива – область, где его атрибутивные характеристики сохраняют актуальность. Копирование примитивов в пределах пространственного домена решает ключевую проблему анализа разреженных данных – отсутствие непрерывного покрытия. Создаваемые копии не дублируют информацию, а формируют промежуточные точки для корректной интерполяции атрибутов.

Отметим, что пространственно-временная анизотропия геопространственных данных, определяемая спецификой описываемых процессов и явлений различной природы происхождения, может привести к принятию неверных решений по атрибутивным значениям искусственно синтезированных копий геопространственных примитивов. Так, к примеру, изменение параметров геомагнитного поля напрямую зависит от принадлежности тому или иному геопространственному региону (например, высокоширотному). В случае отсутствия зарегистрированных атрибутивных значений в локациях нестабильного изменения поля простое копирование не отражает реального или приближенного к нему положения вещей. При этом атрибутивные данные, характеризующие, к примеру, траекторию движения спутника, могут меняться не так критично.

В этой связи необходимо предварительно проанализировать описываемый геопространственными данными процесс и в случае выявления характерных для соответствующих параметров особенностей распределения учитывать их при заполнении пространственных областей. Для повышения эффективности данного процесса возможно использовать один или комбинацию известных геостатистических методов геопространственной интерполяции (в случае геомагнитного поля, к примеру, возможно придерживаться предложенной авторами методики [12–14]).

4. Программная реализация предлагаемого подхода

Для апробации предложенного в работе решения было разработано веб-ориентированное инструментально-программное средство, обеспечивающее возможность оценки атрибутивных параметров, характеризующих взаимное положение геопространственных примитивов. Основная функциональность разработанного приложения предполагает выбор геопространственных слоев для загрузки (реализована работа с парой векторных геопространственных слоев) и формирование соответствующих отчетов.

Архитектура решения построена в традиционной клиент-серверной вариации по принципам паттерна проектирования MVC (Model – View – Controller) [15–17]. Выбор данного шаблона и соответствующей ему архитектуры обусловлен накопленным авторами опытом разработки веб-приложений для обработки и визуализации геопространственной информации [12–14]. В качестве основного стека технологий был выбран язык программирования Python с соответствующим ему фреймворком для реализации веб-архитектуры Django.

Для оценки работоспособности предложенного решения в рамках разработанного программного средства была решена задача определения значений атрибутивных и временных параметров движения искусственного спутника в области аврорального овала. Актуальность решения обозначенной задачи обусловлена практическими запросами на получение данных о влиянии вариаций геофизических полей в высоких широтах на траекторию и иные характеристики движения спутников (рис. 4).

Следует подчеркнуть, что использование аврорального овала в качестве примера служит лишь иллюстрацией возможностей метода, а не указывает на его узкую специализацию. Данный объект был выбран сознательно, так как его сложная динамическая структура позволяет наиболее полно продемонстрировать работу алгоритма с

объектами произвольной геометрии, временными рядами данных, нерегулярными пространственными распределениями. Методика одинаково применима и к другим классам геопространственных объектов, что подтверждается модульной архитектурой разработанного программного решения.

Обозначенная задача предполагает использование двух геопространственных слоев (каждый из которых, в свою очередь, представляет собой файл формата GeoJSON [18–19]). Пространственный слой, отвечающий за представление позиционных границ и атрибутивных характеристик аврорального овала, представляет собой совокупность геопространственных полилиний (изолиний), распределенных по земной поверхности с некоторым шагом дискретизации [20]. Слой, характеризующий траекторию движения спутника, представлен совокупностью пространственных точек, распределенных в пространстве с заданным шагом дискретизации. Атрибутивные и временные характеристики ассоциированы с каждым геопространственным примитивом. Явное пересечение точек и полилиний в рассматриваемых слоях не прослеживается. Вместе с тем объединение точек перемещения спутника в полилинию такое пересечение показывает. Однако формирование нового геопространственного примитива в отдельных точках не наследует атрибутивных и временных характеристик, что является целью решения поставленной практической задачи.

Фактически имеет место следующее. При пересечении некоторой пространственной изолинии спутник входит в зону соответствующей вероятности наблюдения сияния. Это значение сохраняется неизменным на протяжении всего пути до достижения следующей пространственной изолинии. На соответствующие пространственные области распространяются домены значений пространственных изолиний.

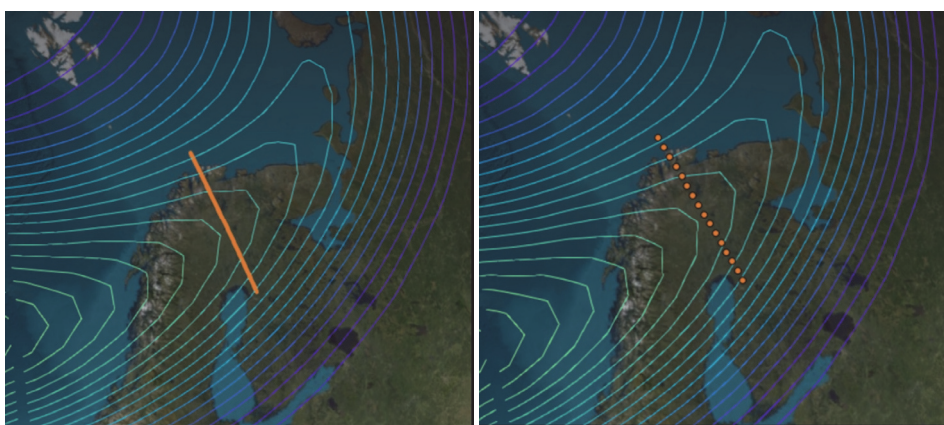


Рис. 4. Примеры экранных форм решения (варианты визуализации анализируемых слоев)

Фактическое пересечение возможно определить только в том случае, если соединить точки перемещения в полилинию. Чтобы не потерять необходимую атрибутивную информацию, пересечение доменов должно быть зафиксировано на уровне отдельных пространственных точек, что соответствует концепции предложенного решения.

Соответствующие функции реализованы в смешанном формате: часть из них определена на уровне клиентской составляющей (обработка данных слоев), а другая – на стороне сервера (для оценки пересечения). Сформированный в результате применения указанных решений график представлен на рис. 5.

В общем случае в рамках разработанного инструментария возможно получение результата в нескольких вариациях. Помимо упомянутого выше графика зависимости атрибутивных параметров различных геопространственных слоев, аналогичный результат может быть представлен в формате CSV-подобного выходного документа, который может быть просмотрен непосредственно в окне приложения или выгружен по заданному расположению.

На данном этапе в разработанном исследовательском прототипе инструментально-программного средства реализована возможность анализа взаимного расположения (в частности, пересечения атрибутивных доменов) для пары векторных геопространственных слоев. В дальнейшем количество и сложность обрабатываемых пространственных слоев будут расширены.

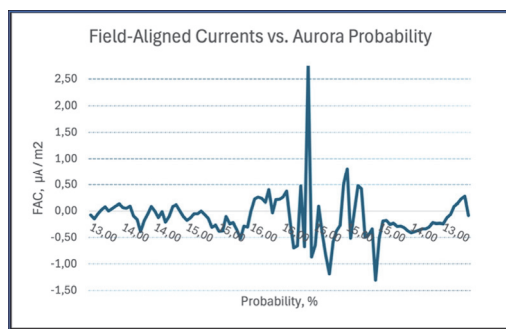


Рис. 5. График зависимости атрибутивных параметров анализируемых слоев

Во многих случаях при оценке взаимного расположения геопространственных примитивов необходимо учитывать временную компоненту. Так, в рассматриваемом в данном параграфе примере временная компонента имеет значение, поскольку имеют место два динамических объекта – траектория движения спутника и изменяющиеся границы аврорального овала. В рассматриваемом решении временная метка ассоциирована с каждым геопространственным примитивом, что в целом позволяет учитывать не только пространственное, но и временное соответствие данных.

В контексте рассматриваемого примера необходимо отметить, что положение аврорального овала может изменяться в зависимости от солнечной активности, геомагнитных возмущений и других факторов. Предложенное решение с учетом доменов изолиний позволяет имитировать специальные буферные зоны вокруг изолиний, если точное положение овала на момент пролета спутника неизвестно.

5. Валидация и оценка эффективности предлагаемого подхода

Для оценки эффективности предложенного подхода была проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на анализ производительности и точности программного решения на реальных данных. При тестировании были выполнены:

- оценка точности интерполяции атрибутивных значений в создаваемых промежуточных пространственных примитивах;
- анализ вычислительной эффективности алгоритма при работе с большими наборами данных;
- сравнение с существующими методами интерполяции при заполнении пространственных разрывов.

В качестве тестовых данных были использованы различные вариации слоя изолиний аврорального овала (характеризующая вероятность наблюдения полярных сияний) и траектория движения спутника миссии SWARM (представленная точками с временными и атрибутивными метками).

Эксперименты были проведены в несколько этапов. На первом этапе была выполнена генерация промежуточных полилиний между соседними изолиниями с шагом дискретизации, рассчитанным в соответствии с (11). Далее были определены значения атрибутивных параметров для сформированных геопространственных примитивов, сначала простым копированием значения от ближайшей изолинии, а затем посредством применения интерполяции на основе значений соседних изолиний. На последующем шаге была выполнена проверка пересечений доменов и корректности распределения полученных значений атрибутов.

В ходе проведения вычислительных экспериментов были получены следующие результаты:

- погрешность: при шаге дискретизации в полградуса по широте и долготе значение среднеквадратической ошибки составило для линейной интерполяции ~5 %, для сплайновой интерполяции – ~3 % от общего диапазона значений атрибута (при этом время отклика увеличилось в среднем на ~20 %);
- производительность: при обработке тестового пространственного слоя с 50 изолиниями в веб-интерфейсе время отклика составило ~1,2 с, что в целом сопоставимо со схожим функционалом, реализованным в QGIS, где время отклика составило 1,5 с.

Было установлено, что метод показал низкую эффективность на данных с нелинейными закономерностями. Требуется ручная настройка шага для разных типов данных. В общем виде результаты вычислительных экспериментов в сравнении с аналогичными ГИС-решениями приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты сравнительных вычислительных экспериментов

Метод	Погрешность (RMSE)	Время обработки	Учет анизотропии
Предлагаемый (копия)	8 %	0,8 с	Нет
Предлагаемый (сплайн)	3 %	1,2 с	Частично
IDW (QGIS)	6 %	1,5 с	Да
Кригинг	2 %	4,0 с	Да

Объективный анализ результатов требует учета специфики методов. Предлагаемый подход ориентирован на сценарии, где критична скорость обработки при приемлемой точности, особенно при работе с динамическими данными. Хотя классические методы демонстрируют меньшую погрешность и учитывают анизотропию, их вычислительная сложность делает их менее пригодными для оперативного анализа.

Сравнение следует интерпретировать в контексте разных целевых задач. Ускорение обработки на 25 % (1,5 с → 1,2 с) становится значимым при массовых вычислениях, а частичный учет анизотропии через адаптивные домены компенсируется возможностью обработки данных в реальном времени.

Полученные результаты свидетельствуют, что предложенный метод демонстрирует конкурентные показатели в специфических условиях обработки данных. Основное его преимущество заключается в обеспечении приемлемой точности (3 % RMSE) при значительном (20 – 25 %) сокращении времени вычислений по сравнению с традиционными методами интерполяции. Это делает подход перспективным для приложений, работающих в режиме реального времени или с большими объемами данных, где важна скорость обработки. Однако для задач,

требующих максимальной точности или работы с неоднородными полями, рекомендуется использовать классические методы, обеспечивающие учет анизотропии и нелинейных эффектов.

Таким образом, предложенный подход занимает нишу между точными, но ресурсоемкими методами и быстрыми, но грубыми приближениями. Его основное преимущество – сбалансированное сочетание скорости и точности для оперативной обработки типовых геопространственных данных, тогда как для сложных случаев с резкими нелинейностями рекомендуется использовать специализированные методы.

Заключение

Анализ известных решений в области геоинформатики показал актуальность решения задачи оценки взаимного расположения векторных геопространственных объектов различной геометрии. В этой связи в работе предложен новый подход к решению обозначенной задачи, в основе которого лежит идея комбинирования пространственных доменов и интерполяции значений соответствующих атрибутивных параметров. Предложенный метод оценки позволяет анализировать возможные пересечения геопространственных примитивов, составляющих различные геопространственные векторные сломы, в том числе в условиях выраженной пространственной анизотропии и разреженной геометрии.

Возможно отметить следующие ключевые преимущества предложенного подхода. В первую очередь, это возможность работы с объектами сложной формы без необходимости их преобразования в сплошные поверхности. Кроме того, метод позволяет учитывать темпоральную составляющую данных (динамику), что особенно важно для анализа изменяющихся во времени геопространственных процессов.

Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили работоспособность метода, продемонстрировав приемлемую погрешность (RMSE ~3 %) и производительность (время обработки слоя с 50 изолиниями составило ~1,2 с). Однако выявлены ограничения, связанные с нелинейными закономерностями в данных, что требует дальнейшей доработки алгоритма.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00143, <https://rscf.ru/project/25-21-00143/>.

References

- [1] Yu J, Ai T, Xu H, Yan L, Shen Y. Inconsistency detection in cross-layer tile maps with super-pixel segmentation. *ISPRS Int J Geo-Inf* 2023; 12(6): 244. doi:10.3390/ijgi12060244.
- [2] Havryliuk Y, Lyashchenko A. Study of the method of spatial identification of polygonal features in the integration of geospatial datasets. In: *Proc Int Conf Young Professionals GeoTerrace-2020*; 2020; 20: 1-5. doi:10.3997/2214-4609.20205744.
- [3] Gali K, Shinde S, Barai V, et al. Geomorphological characteristics of a hydrographic basin using RS and GIS on the example of the Venna River (Maharashtra, India). *Int J Environ Climate Change* 2024; 14(12): 218-231. doi:10.9734/ijecc/2024/v14i124620.
- [4] Eminoglu Y, Tarhan C. Decadal evolution of GIS in disaster management and risk assessment. *Int J Eng Geosci* 2025; 10(2): 173-196. doi:10.26833/ijeg.1544048.
- [5] Chalopin J, Chepoi V, Knauer K. Geometry of convex geometries. *Discrete Comput Geom* 2025; 75(1): 1-30. doi:10.1007/s00454-025-00716-7.
- [6] Zhang Y, Li X. Efficient algorithms for line segment intersection detection in large-scale geospatial data. *Int J Geogr Inf Sci* 2019; 33(5): 987-1005. doi:10.1080/13658816.2018.1550385.
- [7] Patel R, Gupta S. A hybrid approach for line segment intersection detection using spatial indexing and machine learning. *ISPRS Int J Geo-Inf* 2023; 12(1): 45. doi:10.3390/ijgi12010045.
- [8] Wang Y, Liu Z. Real-time intersection detection for dynamic geospatial data streams. *Geospat Inf Sci* 2022; 25(2): 201-215. doi:10.1080/10095020.2022.2033008.
- [9] Cameron T, Fiori R, Perry G, Spicher A. Statistical analysis of off-great circle radio wave propagation in the polar cap. *Radio Sci* 2024; 59(3): e2023RS007897. doi:10.1029/2023RS007897.
- [10] Ren Y, Zhou M, Zhong A. A new Earth system spatial grid extending the great circle arc QTM: the spherical geodesic degenerate octree grid. *ISPRS Int J Geo-Inf* 2025; 14(4): 152. doi:10.3390/ijgi14040152.
- [11] Gluck H, Yang J. Great circle fibrations and contact structures on odd-dimensional spheres. *Geom Dedicata* 2023; 217: 1-26. doi:10.1007/s10711-023-00830-x.
- [12] Vorobev AV, Vorobeva GR. Inductive method of geomagnetic data time series recovering. *SPIIRAS Proc* 2018; 57: 104-133. doi:10.15622/sp.57.5.
- [13] Vorobev AV, Vorobeva GR. An approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images. *Computer Optics* 2024; 48(1): 123-138. doi:10.18287/2412-6179-CO-1279.
- [14] Vorobev AV, Vorobeva GR. An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in web GIS applications. *Computer Optics* 2023; 47(1): 126-136. doi:10.18287/2412-6179-CO-1127.
- [15] Trend A, Gis B, M Penggunaan, et al. GIS-based trend analysis on renewable energy consumption and production in Africa. *J Qual Meas Anal* 2024; 20(2): 181-196. doi:10.17576/jqma-2024-2002-13.
- [16] Rahman M, Naderuzzaman M. Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS. *Int J Inf Technol Comput Sci* 2024; 16(1): 26-34. doi:10.5815/ijitcs.2024.01.03.

- [17] Tiwari V, Varshney M, Singh K, et al. A comparative study of MVC architecture model of open source server side scripting language JSP and PHP for client-server architecture based applications development. *Int J Eng Technol Manag Sci* 2024; 8(2): 19-26. doi:10.46647/ijetms.2024.v08i02.019.
- [18] Fosci P, Psaila G. Soft querying features in GeoJSON documents: the GeoSoft proposal. *Int J Comput Intell Syst* 2023; 16(1): 163. doi:10.1007/s44196-023-00325-3.
- [19] Horbiński T, Lorek D. The use of Leaflet and GeoJSON files for creating the interactive web map of the preindustrial state of the natural environment. *J Spatial Sci* 2022; 67(3): 405-421. doi:10.1080/14498596.2020.1713237.
- [20] DiBiase D. Practical geospatial ethics: concerns, codes, and cases. *Cartogr Perspect* 2025; 105: 1-27. doi:10.14714/CP105.1935.

Сведения об авторах

Воробьева Гульнара Равилевна, 1983 года рождения, в 2005 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления», доктор технических наук, доцент, работает профессором кафедры вычислительной математики и кибернетики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий». Область научных интересов: геоинформационные системы, веб-технологии, системы хранения и обработки информации.

E-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com

Воробьев Андрей Владимирович, 1983 года рождения, в 2006 году окончил магистратуру Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) по направлению «Электроника и микроэлектроника», доктор технических наук, доцент, работает заведующим, профессором кафедры информатики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», а также старшим научным сотрудником ФГБУН «Геофизического центра Российской академии наук» (ГЦ РАН). Область научных интересов: цифровая обработка геомагнитных данных, геоиндуцированные токи, интеллектуальные системы и технологии, геоинформационные системы. E-mail: geomagnet@list.ru

ГРНТИ: 83.77.31

Поступила в редакцию 13 апреля 2025 г. Окончательный вариант 14 августа 2025 г.

Geoinformation system for assessing spatial relationships of vector objects with arbitrary geometry

G.R. Vorobeva¹, A.V. Vorobev^{1,2}

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, Z. Validi st. 32, 450008;

² Geophysical Center of the RAS, Molodezhnaya St. 3, Moscow, 119296, Russia

Abstract

A new approach (method and algorithm) to assessing the relative positions of vector geospatial objects of arbitrary geometry in geoinformation solutions is proposed. The approach is based on the concept of spatial domains and interpolation of attribute parameter values, which together allow analyzing intersections even for geospatial objects with an irregular and sparse structure, such as isolines and point layers. To formalize the proposed approach, a mathematical model is proposed that characterizes the process of forming intermediate geospatial primitives and assessing their attributes using interpolation. To assess the performance of the proposed solution, a research prototype of a web application based on Python and GeoPandas was developed. The computational experiments showed the effectiveness of the proposed approach both with respect to the accuracy of the corresponding values and in terms of the performance of the final web application.

Keywords: geographic information systems, spatial analysis, vector data, computational geometry, interpolation, image processing algorithms.

Citation: Vorobeva GR, Vorobev AV. Geoinformation system for assessing spatial relationships of vector objects with arbitrary geometry. *Computer Optics* 2026; 50(3): 1714. doi:10.18287/COJ1714

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Science Foundation under project No. 25-21-00143.

Author's information

Gulnara Ravilevna Vorobeva (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2005, majoring in Automated Systems of Data Processing and Control, D.Sc. Currently she works as the professor at Computer Science and Robotics department in Ufa University of Science and Technology and as leading mathematician in Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia. Research interests are geoinformation and web technologies, systems of information storing and processing. E-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com

Andrei Vladimirovich Vorobev (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2006, majoring in Electronic and Microelectronics, D.Sc. Currently he works as the head, associate professor at Informatics department in Ufa University of Science and Technology, and as senior researcher in Geophysical Center of RAS, Moscow, Russia. Research interests are digital geomagnetic data processing, geomagnetically induced currents, intelligent systems and technologies, geoinformation systems. E-mail: geomagnet@list.ru

Received on April 13, 2025. The final version – August 14, 2025.
