

АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ГРАНИЦ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ УЧАСТКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

П. К. Шалькевич

*Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь, p.k.shalkevich@gmail.com*

Рассматривается задача установления географической связи между элементарными участками сельскохозяйственных земель смежных турнов агрохимического и радиационного обследования. Анализируются алгоритмы нахождения пересечений многоугольников, используемые в геоинформационных системах (ГИС). Предлагаются подходы для решения поставленной задачи: комбинированный подход и обособленный подход с предпочтением применения алгоритма Вейлера–Атертона.

Ключевые слова: пересечение границ многоугольников; компьютерная графика; вычислительные алгоритмы; ГИС; элементарный участок.

ALGORITHMS FOR DETECTING INTERSECTIONS OF AGRICULTURAL MANAGEMENT ZONES IN GEOINFORMATION SYSTEMS

P. K. Shalkevich

*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,
Minsk, Belarus, p.k.shalkevich@gmail.com*

The paper addresses the problem of establishing a geographic relationship between agricultural management zones from adjacent tours of agrochemical and radiation surveys. Polygon intersection algorithms used in geographic information systems (GIS) are analyzed. Two solution strategies are proposed: a combined approach and a standalone approach prioritizing the Weiler–Atherton algorithm.

Keywords: polygon boundary intersection; computer graphics; computational algorithms; GIS; management zone.

1. Введение

Согласно [1], крупномасштабное агрохимическое и радиационное обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь, проводится по элементарным участкам один раз в установленный период,

называемый туром. Элементарный участок представляет собой теоретически неделимую часть земли, на основании агрохимического и радиационного обследования почвы которой определяется не только количество известкового материала, органических и минеральных удобрений, необходимых для внесения в эту почву, но и радиационная обстановка на сельскохозяйственных землях [2]. Получаемые в процессе обследований данные измерений содержания цезия-137 и стронция-90 в почвах сельскохозяйственных земель являются основой для проведения агрохимических защитных мероприятий [2]. Однако, очевидно, что эти данные представляют ценность не только для оценки радиационной безопасности, но и для комплексной оценки состояния окружающей среды. Известно, что данные обследования элементарных участков по всем турам агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель хранятся в виде оцифрованных карт с геоданными по каждому элементарному участку [3], следовательно, они могут быть использованы в географической информационной системе для комплексной оценки состояния биосферы [4]. Эти данные могут быть использованы для различных целей: формирования ретроспективы обследования сельскохозяйственных земель, обучения нейросетевых моделей прогнозирования радиационной обстановки, верификации работы феноменологических моделей прогнозирования миграции радионуклидов [5] и т.д. Однако, учитывая, что на практике и границы, и нумерация элементарных участков могут изменяться в каждом туре [6], для эффективного использования данных агрохимического и радиационного обследования почв элементарных участков, предварительно необходимо установить географическую связь между элементарными участками разных турор. Учитывая, что границы элементарного участка представляют собой многоугольники, описанные в формате геоданных, связь между элементарными участками может быть установлена путем нахождения пересечений между элементарными участками смежных туроров. Поиску наиболее приемлемых подходов к решению задачи нахождения пересечений между элементарными участками смежных туроров и посвящается настояще сообщение.

2. Обзор и сравнение существующих алгоритмов решения задачи

Для решения задачи вычисления областей пересечения многоугольников в современных ГИС могут быть применены специальные алгоритмы, наибольшую популярность из которых получили следующие [7, 8]: алгоритм Уайлера-Атертона [9], алгоритм Ватти [10] и алгоритм Грайнера-Хорманна [11]. Эти алгоритмы можно условно разделить на те, которые

основываются на идее обхода границ с поиском точек пересечения и те, которые заключаются в реализации сканирующих процедур с поддержкой активных рёбер. На практике эти подходы не конкурируют в чистом виде, а комбинируются: быстрые структуры для поиска пересечений рёбер подают события, а собственно клиппер собирает итоговые контуры согласно принятому правилу заливки. На практике эти подходы не конкурируют в чистом виде, а комбинируются: быстрые структуры для поиска пересечений рёбер подают события, а собственно клиппер собирает итоговые контуры согласно принятому правилу заливки.

Алгоритм Вейлера–Атертона [9] относится к методам обхода границы. Его реализация осуществляет поиск точек пересечения рёбер одного многоугольника с рёбрами другого и их вставке непосредственно в оба контурных списка, классифицируя эти точки как «вход» или «выход», после чего обходит получившийся граф, переходя с границы одного многоугольника на границу другого в точках пересечения. Такой подход прозрачен логически, легко расширяется и хорошо работает для невыпуклых контуров. Алгоритм Вейлера–Атертона поддерживает работу с многоугольниками, содержащими отверстия и вложенные фигуры. Главная сложность — корректная обработка вырожденностей: касания вершины-на-ребре, коллинеарные наложения сегментов, дубликаты вершин, а также строгое соблюдение ориентации контуров и правила заливки. Асимптотическая оценка времени работы алгоритма при быстром обходе может быть описана выражением

$$T(n, m, k) = O((n + m + k) \log(n + m)), \quad (1)$$

где n — число ребер первого многоугольника; m — число ребер второго многоугольника; k — число найденных точек пересечения.

Алгоритм Ватти [10] строится вокруг идеи сканирующей процедуры. Горизонтальная скан-линия проходит через множество локальных минимумов и максимумов, поддерживается активный набор рёбер с упорядочением по оси абсцисс, а правило заливки задаёт, какие горизонтальные отрезки на текущей высоте принадлежат результирующему множеству. Этот подход изначально рассчитан на произвольные многоугольники с отверстиями, сложные иерархии контуров и пересекающиеся границы. Этот алгоритм универсален, но для его реализации требуется внимательность в организации событий, обеспечение стабильности вычислений при сравне-

нии положений рёбер и детальная нормализация данных. Асимптотическая оценка времени работы алгоритма Ватти может быть описана выражением (1), как и в случае с алгоритмом Вейлера-Атертона.

Алгоритм Грайнера–Хорманна [11], как и Вейлера–Атертона, работает методом вставки пересечений в контуры, но упрощает логику обхода за счёт более прямой маркировки «вход/выход» и переключений между границами. В базовом виде он ориентирован на простые (не самопересекающиеся) многоугольники без отверстий, за счёт чего получается компактная и быстрая реализация с малым константным фактором. Поддержка отверстий возможна, но требует дополнительных соглашений и кода. Как и другие методы обхода, он чувствителен к численным эффектам в предикатах ориентации и пересечения отрезков. Асимптотическая оценка времени работы алгоритма Грайнера–Хорманна может быть описана выражением (1). Стоит также отметить, что компьютерная реализация алгоритмов Ватти и Грайнера–Хорманна требует применения двусвязных списков, что связано с большими затратами памяти при выполнении вычислительных операций [8].

Помимо описанных выше алгоритмов для решения задачи вычисления областей пересечения многоугольников существует ряд более простых алгоритмов [12, 13]: алгоритм сканирующей прямой Бентли–Оттмана [14], алгоритм Шамоса–Хауи [15]. Классическая сканирующая прямая Бентли–Оттмана обеспечивает асимптотически быстрый поиск пересечений рёбер: события формируются из левых/правых концов сегментов и найденных пересечений, поддерживается упорядоченный по вертикали список активных рёбер, а каждая операция выполняется за логарифмическое время. На том же принципе основан и алгоритм Шамоса–Хауи, но только для определения факта пересечения. Так, асимптотическая оценка времени работы алгоритма Шамоса–Хауи может быть описана выражением

$$T(n, m) = O((n + m) \log(n + m)). \quad (2)$$

Учитывая выражение (2), очевидно, что алгоритм Шамоса–Хауи рационально использовать в качестве предварительного алгоритма для фильтрации пересекающихся и не пересекающихся элементарных участков.

С практической точки зрения целесообразно рассматривать перечисленные выше алгоритмы, как взаимодополняющие, однако для выявления наиболее удачных комбинаций необходимо проводить вычислительный эксперимент. Сравнительный анализ характеристик перечисленных алгоритмов на основе источников [9–11, 14, 15] представлен ниже (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ характеристик алгоритмов определения пересечений границ элементарных участков

Наименование алгоритма	Асимптотика	Построение геометрии	Робастность к сложным входам
Вейлера–Атертона	$O((n + m + k) \log(n + m))$	да	Средняя
Ватти	$O((n + m + k) \log(n + m))$	да	Высокая
Грайнера–Хорманна	$O((n + m + k) \log(n + m))$	да	Средняя
Бентли–Оттмана	$O((n + m + k) \log(n + m))$	нет	Средняя–высокая
Шамоса–Хауи	$O((n + m) \log(n + m))$	нет	Средняя–высокая

3. Заключение

Географическая связь между элементарными участками сельскохозяйственных земель смежных турков обследования может быть установлена путем нахождения пересечений границ элементарных участков. Учитывая, что границы элементарного участка представляют собой многоугольники, описанные в формате геоданных, связь между элементарными участками может быть установлена путем применения алгоритмов нахождения пересечений у многоугольников в рамках ГИС.

Сравнительный анализ существующих алгоритмов вычисления пересечений анализ показал, что для определения пересечений границ элементарных участков разных турков агрохимического и радиационного обследования почв наиболее перспективным является комбинированный подход: быстрые алгоритмы, например, Шамоса–Хауи целесообразно использовать для предварительной фильтрации пересекающихся участков, а более точные (Ватти, Вейлера–Атертона, Грайнера–Хорманна) — для построения геометрии пересечений. Такой подход позволит повысить эффективность обработки больших массивов геоданных, однако требует проведения вычислительных экспериментов. Если же рассматривать обоснованное применение, быстрые алгоритмы Бентли–Оттмана и Шамоса–Хауи не способны решить поставленную задачу, т.к. они не выполняют геометрических построений, а из более точных алгоритмов наиболее перспективным является алгоритм Вейлера–Атертона, т.к. его компьютерная реализация требует меньших затрат памяти, чем компьютерная реализация алгоритмов Ватти и Грайнера–Хорманна.

Библиографические ссылки

1. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. Минск : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2020.

2. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.]. Минск : ИВЦ Минфина, 2022.
3. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]. Минск : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси. 2022.
4. Система управления данными и программное обеспечение для комплексной оценки состояния биосфера / П. К. Шалькевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 92–99.
5. Шалькевич П. К. Компьютерное прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2021. Т. 65, № 2. С. 139–145.
6. Черныш А. Ф. Мониторинг земель: учебное пособие. Минск: БГУ, 2010.
7. An algorithm for polygon clipping, and for determining polygon intersections and unions / Y. K. Liu [et al.] // Computers & Geosciences. 2007. Vol. 33, № 5. P. 589–598.
8. Foster E. L., Hormann K., Popa R. T. Clipping simple polygons with degenerate intersections // Computers & Graphics: X. 2019. Vol. 2. P 1–8.
9. Weiler K. Hidden surface removal using polygon area sorting // Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '77). 1977. P. 214–222.
10. Vatti R. B. A generic solution to polygon clipping // Communications of the ACM. 1992. Vol. 35, № 7. P. 56–63.
11. Greiner G., Hormann K. Efficient clipping of arbitrary polygons // ACM Transactions on Graphics. 1998. Vol. 17, № 2. P. 71–83.
12. Garau L. A robust approach to detect intersections between triangles with different numerical representations // Computer Science Research Notes. 2025. No. 7. P. 73–80.
13. Dimri S. C. An efficient algorithm to clip a 2D-polygon against a rectangular clip window // Applied Mathematics. A Journal of Chinese Universities. 2022. Vol. 37. P. 147–158.
14. Bentley J. L. Algorithms for reporting and counting geometric intersections // IEEE Transactions on Computers. 1979. Vol. C-28, № 9. P. 643–647.
15. Shamos M. I. Geometric intersection problems // 17th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS '76). 1976. P. 208–215.