

## 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](mailto:p.k.shalkevich@gmail.com)*

Рассматривается задача установления географической связи между элементарными участками сельскохозяйственных земель смежных туров 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](mailto: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 туров. 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 туров. Поиску наиболее приемлемых подходов к решению задачи нахождения пересечений между элементарными участками смежных туров и посвящается настоящее 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 вставку 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 вершина-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).

**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 туров 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 туров 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 обособленное 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 биосферы / 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., Pota 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.