

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)

ИНФОРМАТИКА INFORMATICS

УДК 519.852.6,004.925
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2026-62-1-78-88>

Поступила в редакцию 25.09.2025
Received 25.09.2025

П. К. Шалькевич^{1,2}, Е. С. Ероминон²

¹*Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета, Республика Беларусь*

АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ УЧАСТКОВ РАЗНЫХ ТУРОВ АГРОХИМИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Аннотация. Рассмотрено решение задачи определения географической взаимосвязи элементарных участков (ЭУ) различных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель Республики Беларусь. Предложен вычислительный алгоритм для определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования земель, основанный на применении алгоритма Уайлера – Атертона, который позволяет находить области пересечения границ элементарных участков и выполнять расчет процентного вхождения площадей ЭУ предыдущего тура в ЭУ текущего тура, что делает возможным установление между ними связей типа «родитель – потомок». Разработанное на основе предложенного алгоритма программное обеспечение реализовано с использованием современных веб-технологий (PHP, Drupal, MySQL, Bootstrap, Leaflet), что обеспечивает пакетную обработку больших массивов геоданных, визуализацию границ ЭУ на интерактивной карте и создание удаленного доступа к получаемым результатам. Апробация метода на материалах предполагаемых 15-го и 16-го туров агрохимического обследования показала его эффективность для выявления пространственных соответствий между ЭУ. Разработанные вычислительный алгоритм и программное обеспечение открывают новые возможности для ведения истории полей, расчета доз удобрений и оценки их эффективности, а также для решения инновационных задач точного земледелия и комплексной оценки состояния биосферы.

Ключевые слова: элементарный участок, алгоритмы пересечения многоугольников, алгоритм Уайлера – Атертона, анализ геоданных, история поля, геоинформационная система, ГИС, агрохимическое обследование, мониторинг окружающей среды

Для цитирования. Шалькевич, П. К. Алгоритмы и программное обеспечение для определения взаимосвязей элементарных участков разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель / П. К. Шалькевич, Е. С. Ероминон // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-матэматычных навук. – 2026. – Т. 62, № 1. – С. 78–88. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2026-62-1-78-88>

Pavel K. Shalkevich¹, Evgeniy S. Yeraminok²

¹*Institute of System Researches in Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR DETERMINING INTERRELATIONS BETWEEN AGRICULTURAL MANAGEMENT ZONES IN DIFFERENT TOURS OF AGROCHEMICAL SURVEYS

Abstract. The study considers the problem of determining geographical relationships between agricultural management zones (MZs) across different rounds of agrochemical surveys of agricultural lands in the Republic of Belarus. A computational algorithm is proposed for identifying relationships between MZs from successive survey rounds, based on the application of the Weiler – Atherton polygon clipping algorithm. The algorithm enables the detection of intersection areas between MZ

boundaries and the calculation of the percentage of overlap between MZs of the previous and current survey rounds, thereby allowing the establishment of hierarchical “parent – child” relationships among them. Software developed on the basis of the proposed algorithm was implemented using modern web technologies (PHP, Drupal, MySQL, Bootstrap, Leaflet). The system provides batch processing of large volumes of geospatial data, interactive visualization of MZ boundaries on digital maps, and remote access to analytical results. Experimental validation using geodata from the supposed 15th and 16th agrochemical survey rounds demonstrated the effectiveness of the proposed approach in identifying spatial correspondences between MZs. The developed computational algorithm and software offer new opportunities for the field history maintaining, optimization of fertilizer application rates, and evaluation of their agronomic efficiency, as well as for addressing advanced challenges in the precision agriculture and comprehensive biosphere assessment.

Keywords: agricultural management zone, polygon intersection algorithms, Weiler – Atherton algorithm, geospatial data analysis, field management history, geo-information system, GIS, agrochemical survey, environmental monitoring

For citation. Shalkevich P. K., Yeraminok E. S. Algorithms and software for determining interrelations between agricultural management zones in different tours of agrochemical surveys. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2026, vol. 62, no. 1, pp. 78–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2026-62-1-78-88>

Введение. Данные о результатах проведения мониторинга состояния почвенного покрова и плодородия сельскохозяйственных земель Республики Беларусь накапливаются на различных иерархических уровнях, первым из которых является уровень элементарных участков [1]. ЭУ представляет собой теоретически неделимую часть земли, на основании агрохимического обследования почвы которой рассчитывается количество известкового материала, органических и минеральных удобрений, необходимых для внесения в эту почву, определяется эффективность внесенных удобрений, баланс элементов питания, радиационная обстановка на сельскохозяйственных землях [2]. Агрохимическое обследование сельскохозяйственных земель в нашей стране проводится по элементарным участкам один раз в установленный период, называемый туром [3]. На протяжении более чем 50 лет [4] результаты каждого тура обследования анализируются на уровне районов в сопоставлении с результатами предыдущих туров и публикуются в открытой печати [5]. Эти данные могут быть использованы для создания истории полей, однако на уровне районов они не дают достаточно информации для принятия эффективных решений по развитию сельскохозяйственных земель на уровне полей и хозяйств, что имеет особую значимость в условиях внедрения технологий точного земледелия.

Информация о состоянии агрохимических показателей плодородия почв на уровне полей и хозяйств формируется на основании данных обследования элементарных участков, ретроспективный анализ которых поможет создать наиболее точную версию истории полей в республике. Однако проведение такого анализа требует решения ряда проблем, одна из которых связана с непостоянством границ ЭУ. На практике границы последних могут изменяться в каждом туре обследования [6], к тому же в 2020 г. были изменены диапазоны размеров элементарных участков с 3–20 до 0,5–10 га [3]. Следовательно, количество, границы и площади ЭУ в рамках одного и того же поля в каждом новом туре обследования могут быть разными. Кроме того, соблюдение в проводимом туре обследования такой же нумерации элементарных участков, как и в предыдущем, носит рекомендательный характер [6], из чего следует, что даже при совпадении границ один и тот же ЭУ в каждом новом туре может иметь новый номер. В таких условиях возможна ситуация, когда, например, в текущем туре обследования будет сформировано 3 элементарных участка с номерами 1, 23 и 38 соответственно, тогда как в предыдущем туре на их месте был всего один элементарный участок с номером 17. Получается, что участки текущего тура с номерами 1, 23 и 38 не обследовались в таком же виде в туре предыдущем, однако нельзя сказать, что их территории не были обследованы вовсе – они были обследованы в границах участка 17 предыдущего тура. Значит, данные обследования ЭУ 17 предыдущего тура являются историческими данными для участков 1, 23 и 38 текущего тура. Разумеется, характер учета этих данных еще предстоит выяснить, но очевидно, что задача определения географической взаимосвязи между ЭУ разных туров обследования представляет собой высокую научную и практическую значимость.

Учитывая тот факт, что результаты крупномасштабного агрохимического обследования почв по каждому туру хранятся в виде оцифрованных карт с геоданными по каждому элементарному участку [5], географическая взаимосвязь границ ЭУ различных туров обследования сельскохозяйственных земель может быть определена путем применения к данным этих карт методов

компьютерной графики, используемых для нахождения областей пересечения двумерных многоугольников (которыми являются границы ЭУ). Поэтому наше исследование посвящено решению задачи определения географической взаимосвязи ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель.

Мировая практика решения задач, связанных с обработкой геоданных элементарных участков. В мировой практике современные исследования с применением геоданных ЭУ в основном посвящены разработке критериев по формированию границ ЭУ для решения задач рационального использования удобрений, повышения урожайности [7–10] и принятия решений в области экологии [7, 11]. Так, в [7–10] были предложены методы по формированию границ ЭУ на основе геоданных, а в [11] – методы коррекции их границ для точной оценки последствий внесения пестицидов. Кроме того, существуют исследования, в которых геоинформационные технологии применяются для решения задач агроэкологического мониторинга и оптимизации землепользования в контексте уже устоявшихся границ ЭУ [12, 13].

Следует также отметить, что элементарные участки в мировой практике используются как основа для ведения точного земледелия [14, 15]. Это объясняет тенденцию к минимизации их размеров. Так, в США, которые считаются мировым лидером в области точного земледелия, площадь ЭУ не превышает 2 га [16], к такому же показателю стремятся и в Китае [17]. В Европе ситуация отличается для каждой страны, но в среднем площадь ЭУ не превышает 4 га (на примере Польши)¹. Очевидно, что и в Беларуси уменьшение площадей ЭУ до 0,5–10 га [3] связано с необходимостью внедрения технологий точного земледелия, так как предыдущих размеров в 20 га было явно для этого недостаточно [18]. Однако уникальный опыт нашей страны заключается в том, что, несмотря на сравнительно большие размеры ЭУ, их агрохимический состав методично отслеживался с 1960-х гг. [4]. Таким образом, решение задачи определения географической взаимосвязи границ ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель станет первым шагом для создания наиболее достоверной, математически точной истории полей, которая в последующем обеспечит наиболее эффективный переход к технологиям точного земледелия в республике.

Алгоритмы поиска пересечений границ элементарных участков. Более чем за 60-летнюю практику крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель в Республике Беларусь, в каждой области было выполнено не менее, чем 12 туров обследований [3]. При наличии информации о границах ЭУ в каждом из этих туров в виде векторных форматов SHP, GeoJSON, KML или их аналогов и при соблюдении условия о том, что границы каждого отдельно взятого ЭУ будут иметь форму многоугольника, могут быть найдены все области пересечения ЭУ смежных туров. Таким образом, 2 отдельно взятых ЭУ в смежных турах могут быть представлены в виде многоугольников S и P :

$$P = \{p_i, p_{i+1}, \dots, p_n\}, \quad Q = \{q_j, q_{j+1}, \dots, q_m\}, \quad (1)$$

где P – многоугольник, описывающий границы ЭУ в одном туре обследования; Q – многоугольник, описывающий границы ЭУ в другом туре обследования; p_i – i -я вершина многоугольника P ; q_j – j -я вершина многоугольника Q ; n – количество вершин многоугольника P ; m – количество вершин многоугольника Q . Тогда ребра многоугольников P и Q могут быть заданы следующим образом:

$$e_i^P = [p_i, p_{i+1}], \quad p_{n+1} = p_1, \quad e_j^Q = [q_j, q_{j+1}], \quad q_{m+1} = q_1, \quad (2)$$

где e_i^P – i -е ребро многоугольника P , соединяющее вершины p_i и p_{i+1} ; $p_{n+1} = p_1$ – условие замыкания многоугольника P ; e_j^Q – j -е ребро многоугольника Q , соединяющее вершины q_j и q_{j+1} ; $q_{m+1} = q_1$ – условие замыкания многоугольника Q . Следовательно, задача нахождения областей пересечения ЭУ смежных туров сводится к нахождению пересечений ребер многоугольников, описывающих границы этих ЭУ. Для решения данной задачи в современных ГИС могут быть при-

¹ Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Pobieranie próbek. PN-R-04031:1997. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 1997. 5 s.

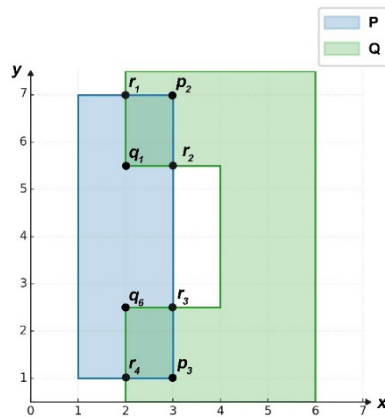


Рис. 1. Пример применения алгоритма Уайлера – Атертона для решения задачи нахождения областей пересечения ЭУ с границами P и Q

Fig. 1. An example of the Weiler – Atherton algorithm application to solve the task of detecting the intersection of managing zones with the boundaries of P and Q

менены специальные алгоритмы, наибольшую популярность из которых получили следующие [19, 20]: алгоритм Уайлера – Атертона [21], алгоритм Ватти [22] и алгоритм Грайнера – Хорманна [23]. Известно, что для компьютерной реализации два последних алгоритма требуют применения двусвязных списков, что обусловлено большими затратами памяти при выполнении вычислительных операций [20]. Учитывая, что земли сельскохозяйственного назначения в Беларуси занимают 9050,0 тыс. га [24], а площадь ЭУ составляет 0,5–10 га [3], количество ЭУ в каждом туре обследования начиная с 2020 г. будет превышать 900 тыс. Следовательно, применение алгоритмов, реализация которых требует высоких затрат памяти, нежелательно для решения задачи нахождения областей пересечения ЭУ смежных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель Республики Беларусь, что обосновывает выбор алгоритма Уайлера – Атертона в качестве наиболее предпочтительного.

Применение алгоритма Уайлера – Атертона [21] для решения поставленной задачи требует решения следующих подзадач: поиск пересечений ребер многоугольников P и Q (осуществляется по часовой стрелке); классификация найденных пересечений на входные и выходные; формирование областей пересечения по найденным точкам пересечения. Вычисление пересечений ребер многоугольников P и Q для каждого ребра e_i^P и e_j^Q может быть описано следующим уравнением:

$$p_i + \lambda(p_{i+1} - p_i) = q_j + \mu(q_{j+1} - q_j), \quad \lambda, \mu \in [0, 1], \quad (3)$$

где λ – параметр, определяющий положение точки пересечения на ребре e_i^P ; μ – параметр, определяющий положение точки пересечения на ребре e_j^Q . Решение уравнения (3) позволит получить множество R точек пересечения границ многоугольников P и Q :

$$R = \{r_k, r_{k+1}, \dots, r_l\}, \quad (4)$$

где R – множество точек пересечения границ многоугольников P и Q ; r_k – k -я точка множества R ; l – количество точек множества R . Далее, найденные точки необходимо классифицировать на входные и выходные. Например, точки r_1 и r_3 , показанные на рис. 1, являются входными, а точки r_2 и r_4 – выходными.

После того как точки пересечения найдены, они должны быть добавлены в списки вершин каждого из рассматриваемых многоугольников. Затем необходимо произвести обход по ребрам многоугольников P и Q от входной точки до выходной и обратно. Учитывая, что каждой входной точке будет всегда соответствовать выходная [21] и что количество пар точек входа и выхода во множестве R будет в 2 раза меньше количества точек в этом множестве, результатом выполнения алгоритма Уайлера – Атертона для ЭУ будет s многоугольников S :

$$S_s = \bigcup_s G_s, \quad (5)$$

где S – многоугольник, описывающий границы пересечения многоугольников P и Q ; G_s – замкнутый маршрут (цикл) по ребрам e_i^P и e_j^Q , построенный от точки входа r_k и соответствующей ей точки выхода r_{k+l} ; s – количество пар точек входа и выхода.

Разработка вычислительного алгоритма определения взаимосвязей элементарных участков разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель. Для решения задачи определения географической взаимосвязи элементарных участков разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель, кроме поиска пересечений их границ, необходимо установить процент вхождения ЭУ предыдущего тура в ЭУ текущего. Учитывая, что границы отдельно взятого ЭУ текущего тура могут иметь пересечения с несколькими ЭУ предыдущего тура, предлагается устанавливать между такими ЭУ связь типа «родитель – потомок». Так, ЭУ предыдущего тура обследования, границы которых пересекаются с ЭУ текущего тура обследования, будут родителями последнего. А зная площади пересечения границ, будет несложно установить процент совпадения площадей родителей с потомком. Следовательно, сравнив ЭУ всех смежных туров обследования сельскохозяйственных земель, мы получим иерархические связи между ЭУ, начиная с первого тура обследования. Эти связи и сделают возможным формирование достоверной истории полей, необходимой для целей точного земледелия [25, 26].

Таким образом, после определения пересечений границ ЭУ различных туров агрохимического обследования необходимо выполнить количественную оценку степени их родства, что позволит установить логическую преемственность между ЭУ, которые не имеют явной идентификационной связи, но границы которых совпадают или частично накладываются. Для этого, при наличии геометрического пересечения границ двух ЭУ (предыдущего и текущего туров обследования), предлагается выполнять расчет отношения площади пересечения к общей площади ЭУ текущего (более нового) тура обследования. Рассчитанное значение предлагается выражать в процентах и обозначать как процент вхождения площади родительского элемента в площадь дочернего. Такой подход позволит выявить полное или частичное совпадение ЭУ, зафиксировать случаи деления одного ЭУ на несколько и объединения нескольких ЭУ в один.

Для последующей программной реализации вычислительного алгоритма определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель предлагается ввести для обозначения ЭУ программные сущности, в которых будет указываться информация о туре обследования ЭУ и геоданные ЭУ. Полученный вычислительный алгоритм показан на рис. 2.

Программная реализация алгоритма определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель. Для программной реализации разработанного алгоритма были выбраны хорошо зарекомендовавшие себя технологии веб-разработки, применяемые в ГИС комплексной оценки состояния биосферы [27]: язык программирования PHP, система управления содержимым Drupal и СУБД MySQL. Выбор СУБД MySQL обусловлен также тем, что в ней для реализации функций ГИС используется библиотека Boost.Geometry¹, в которой для выполнения операций поиска пересечений используется алгоритм Уайлера – Атертона². Графический пользовательский интерфейс (ГПИ) программного обеспечения для определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель был разработан при помощи фреймворка Bootstrap 5. Для отображения границ ЭУ на интерактивной карте были использованы библиотеки Leaflet и OpenStreetMap.

Для импорта геоданных была разработана форма, которая поддерживает загрузку геоданных в форматах SHP, DBF или SHX (рис. 3). После нажатия кнопки «Поиск родителей участков»

¹ MySQL: Making Use of Boost Geometry in MySQL GIS. Cambridge, 2025. URL: <https://dev.mysql.com/blog-archive/making-use-of-boost-geometry-in-mysql-gis/> (date of access: 14.09.2025).

² Barend's Blog: Intersections (1) / Barend Gehrels // Barend's Blog. 2010. URL: <https://barendgehrrels.blogspot.com/2010/12/intersections-1.html> (date of access: 14.09.2025).

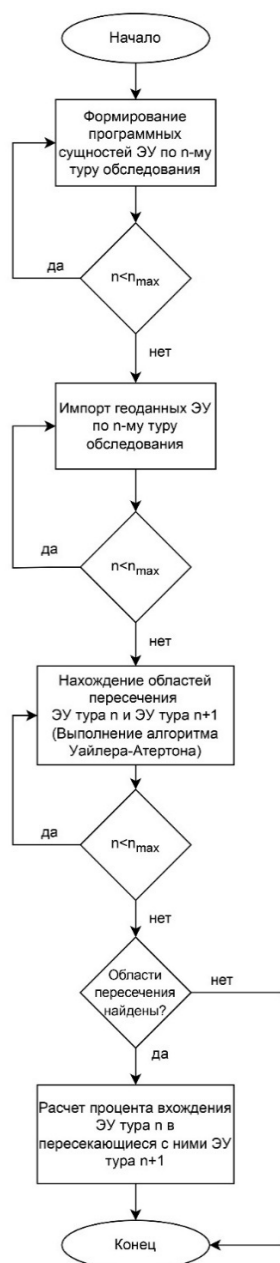


Рис. 2. Вычислительный алгоритм определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель

Fig. 2. Computational algorithm for determining interrelations between agricultural management zones in different tours of agrochemical surveys

начинается выполнение вычислительного алгоритма, представленного на рис. 2. Пакетная обработка данных выполняется при помощи Drupal Batch API. В качестве сервера был использован персональный компьютер на базе процессора Intel Core i3-9100 3.60GHz, объем оперативной памяти составил 16 Гб.

Были импортированы геоданные ЭУ по предполагаемым 15-му и 16-му турам обследования тестового хозяйства, относящегося к Минскому району Минской области. Количество ЭУ в 15-м туре составило 100 тыс., в 16-м – 80 тыс. Поиск пересечений выполнялся 38 мин 49 с. Отображение ЭУ 15-го и 16-го туров в разработанном программном обеспечении для определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель показано на рис. 4.

Рис. 3. Форма импорта геоданных ЭУ в программном обеспечении для определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель

Fig. 3. Agricultural management zones geodata import form in the software for linking agricultural management zones across different tours of agrochemical surveys

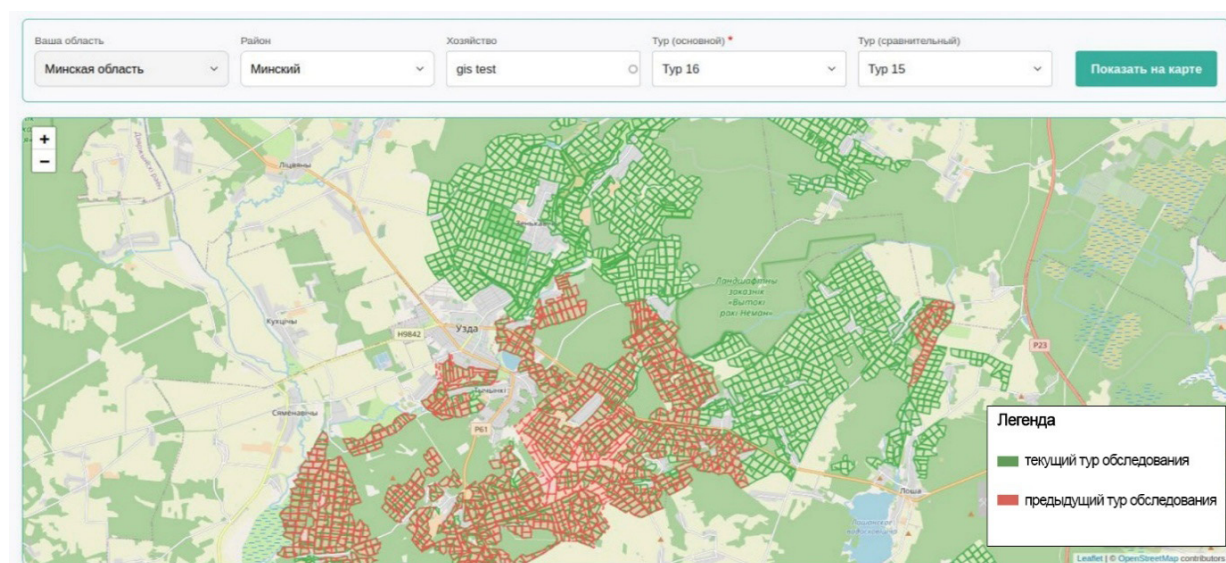


Рис. 4. Отображение ЭУ 15-го и 16-го туров в программном обеспечении для определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель

Fig. 4. Visualization of agricultural management zones from the 15th and 16th tours in the software for linking agricultural management zones across different tours of agrochemical surveys

Результаты и их обсуждение. В результате выполнения разработанного вычислительного алгоритма определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель для предполагаемых 15-го и 16-го туров обследования тестового хозяйства Минского района Минской области были установлены проценты вхождения границ ЭУ 15-го тура в ЭУ 16-го тура. Созданное на основе предложенного вычислительного алгоритма программное обеспечение позволяет через ГПИ выделить участок и мгновенно отобразить его границы и границы его пересечений с участками предыдущего тура, получив визуальное подтверждение степени пространственного сходства между ЭУ различных туров (рис. 5, а–с). Кроме того, через специальную форму пользователь может увидеть всех родителей выбранного ЭУ (рис. 5, d).

Результаты определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель для предполагаемых 15-го и 16-го туров обследования, показанные на примере ЭУ 533 15-го тура и ЭУ 922 и 390 16-го тура (см. рис. 5), свидетельствуют о том, что разработанное программное обеспечение представляет собой аналитический инструмент с гибкими возможностями визуализации. Кроме того, созданные в процессе реализации вычислительного алгоритма определения взаимосвязей ЭУ разных туров обследования программные сущности ЭУ могут быть легко расширены любыми атрибутивными и метаданными, что позволит решать не только стандартные задачи в сельском хозяйстве, связанные с расчетом доз

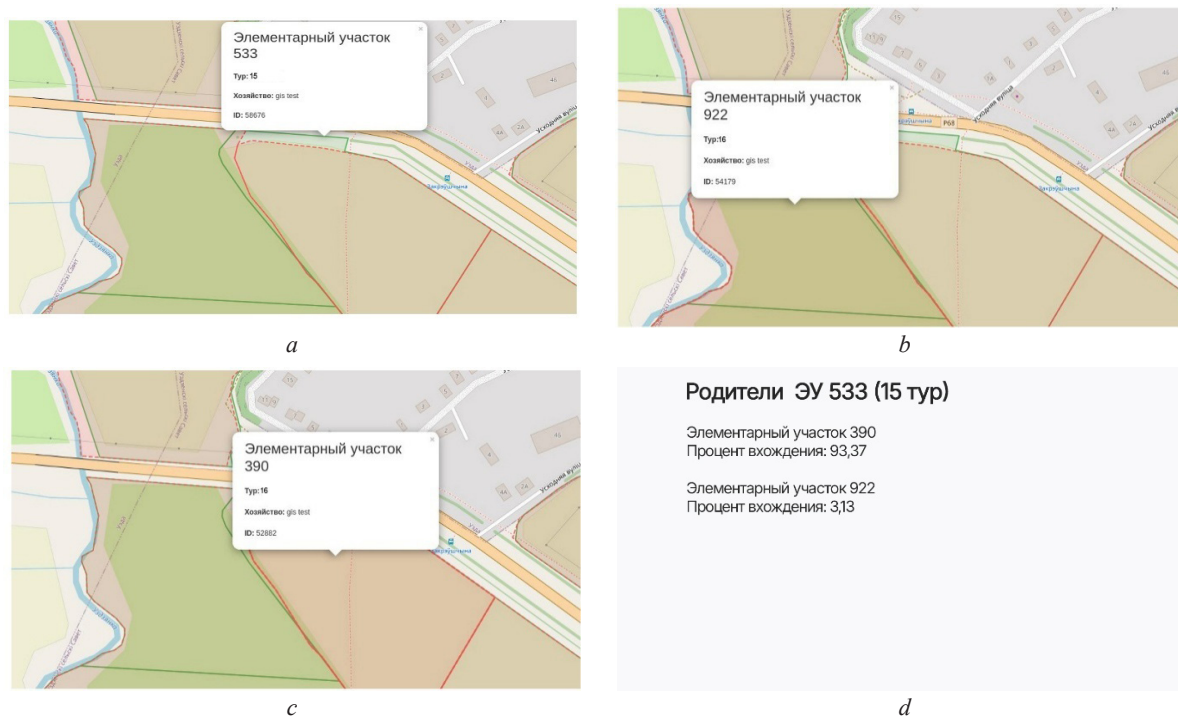


Рис. 5. Отображение на карте ЭУ 533 15-го тура обследования (а), ЭУ 922 16-го тура обследования (б), ЭУ 390 16-го тура обследования (с) и результаты расчетов их взаимосвязей (д)

Fig. 5. Visualization of agricultural management zone 533 from the 15th tour of agrochemical survey (a), agricultural management zone 922 from the 16th tour of agrochemical survey (b), agricultural management zone 390 from the 16th tour of agrochemical survey (c) and the calculation results for linking these management zones

внесения удобрений и оценкой их эффективности, но и инновационные аналитические задачи, обеспечивающие эффективное внедрение технологий точного земледелия. Также полученные результаты позволят использовать данные крупномасштабных агрохимических обследований в составе ГИС комплексной оценки состояния биосферы.

Важно отметить, что технологии, примененные для программной реализации алгоритма определения взаимосвязей ЭУ разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель, предоставляют возможность удаленного доступа к реализованному интерфейсу и полученным результатам. Следовательно, в отличие от стационарных ГИС, хотя и обеспечивающих широкие возможности по работе с геоданными на локальном персональном компьютере, разработанное программное обеспечение может быть адаптировано для работы онлайн аналитических, агрохимических и проектно-сметных отделов различных организаций, как научно-исследовательских институтов (Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси и др.) или областных проектно-изыскательских станций химизации сельского хозяйства, так и любого сельскохозяйственного предприятия Республики Беларусь. Кроме того, доступ к различной функциональности программного обеспечения может быть разграничен по ролям: аналитический отдел может работать только с геоданными, агрохимический – давать информацию об агрохимических обследованиях и анализировать результаты, полученные после обработки геоданных, проектный – формировать план внесения удобрений и сметы на основе данных, внесенных двумя другими отделами.

В качестве перспектив по развитию разработанных алгоритма и программного обеспечения может быть рассмотрено применение технологий параллельных вычислений [28] или использование древовидных структур данных [29] для ускорения вычислений пересечений границ ЭУ.

Заключение. Впервые разработаны вычислительный алгоритм и программное обеспечение для определения взаимосвязей элементарных участков разных туров агрохимического обследования сельскохозяйственных земель Республики Беларусь. Предложенный алгоритм основан на

применении алгоритма Уайлера – Атертона для нахождения областей пересечения ЭУ и на расчете процентов вхождения площадей ЭУ предыдущего тура в ЭУ текущего тура обследования, что делает возможным установление связей типа «родитель – потомок» между ЭУ разных туров обследования. Программная реализация разработанного алгоритма выполнена на базе современных веб-технологий, обеспечивающих применение пакетной обработки больших массивов геоданных и создание ГПИ с функциями визуализации и анализа результатов. Разработанные вычислительный алгоритм и программное обеспечение открывают новые возможности для ведения истории полей, расчета доз удобрений и оценки их эффективности, а также для решения инновационных задач точного земледелия и комплексной оценки состояния биосферы. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения данных многолетних агрохимических обследований на уровне элементарных участков для повышения качества агроэкологического мониторинга и эффективности управления земельными ресурсами.

Список использованных источников

1. Основные мероприятия по повышению плодородия почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 годы / В. В. Лапа, Н. Н. Цыбулько, М. В. Рак [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2020. – № 2. – С. 7–25.
2. Справочник агрохимика / В. В. Лапа, Н. Н. Цыбулько, М. В. Рак [и др.]; Ин-т почвоведения и агрохимии; под ред. акад. В. В. Лапа. – 2-е изд. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – 260 с.
3. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич, В. В. Лапа, Н. Н. Цыбулько [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 2020. – 45 с.
4. Богдевич, И. М. Полвека формирования и оптимизации агрохимических показателей плодородия пахотных и луговых почв Беларуси / И. М. Богдевич, Ю. В. Путятин, И. С. Станилевич // Почвенные и земельные ресурсы: традиционные и инновационные подходы к изучению и управлению: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию образования каф. почвоведения и геоинформ. систем БГУ и 85-летию со дня рождения д-ра геогр. наук, проф. В. С. Аношко, Минск, 21–24 сент. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: А. Н. Червань (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 20–24.
5. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.) / И. М. Богдевич, В. В. Лапа, М. В. Рак [и др.]. – Минск: Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2022. – 275 с.
6. Черныш, А. Ф. Мониторинг земель: учеб. пособие / А. Ф. Черныш. – Минск: БГУ, 2010. – 248 с.
7. Management zone delineation: utilizing multiple data sources to minimize soil spatial variability in commercial potato fields under Prince Edward Island pedoclimatic conditions / B. Javed, A. N. Cambouris, M. Duchemin [et al.] // Canadian Journal of Soil Science. – 2025. – Vol. 105. – P. 1–18. <https://doi.org/10.1139/cjss-2024-0019>
8. Management zone delineation strategies for phosphorus fertilizer recommendations under a no-till field in Eastern Canada / J. D. Nze Memiaghe, A. N. Cambouris, M. Duchemin [et al.] // Canadian Journal of Soil Science. – 2025. – Vol. 105. – P. 1–21. <https://doi.org/10.1139/cjss-2023-0088>
9. Development and evaluation approach of soil quality in agricultural soils: Integrated system for a more reliable delineation of homogeneous management zones / V. Perović, D. Čakmak, D. Jakšić [et al.] // Applied Soil Ecology. – 2025. – Vol. 206. – Art. ID 105860. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105860>
10. Delineation of field management zones based on soil properties in the Sudan and Sahel savannas of northern Nigeria / A. E. Eneji, V. Otie, A. Isong [et al.] // Journal of Agriculture and Food Research. – 2025. – Vol. 21. – Art. ID 101812. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101812>
11. Paulukonis, E. A. Spatiotemporally derived agricultural field delineations for species effects assessments and environmental decision support / E. A. Paulukonis, S. T. Purucker // Science of The Total Environment. – 2025. – Vol. 958. – Art. ID 177967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177967>
12. Киндеев, А. Л. Методика учета почвенно-агрохимического потенциала для оптимизации структуры землепользования Воложинского района Республики Беларусь / А. Л. Киндеев, Н. В. Клебанович // Вестник Московского университета. Серия 17, Почвоведение. – 2024. – Т. 79, № 2. – С. 63–72.
13. Лукин, С. В. Применение геоинформационных систем для агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных земель / С. В. Лукин, И. Г. Костин, Е. С. Малышева // Агрохимический вестник. – 2019. – № 4. – С. 8–13.
14. Shannon, D. K. Precision Agriculture Basics / D. K. Shannon, D. E. Clay, N. R. Kitchen. – American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2018. – 272 p. – (ASA, CSSA, and SSSA Books). <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics>
15. An improved method of delineating rectangular management zones using a semivariogram-based technique / Xiaohu Zhang, Li Jiang, Xiaolei Qiu [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2016. – Vol. 121. – P. 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.016>
16. Мыслыва, Т. Прецизионные технологии: мировой опыт и перспективы для Беларуси / Т. Мыслыва, М. Шелюто, О. Куцаева // Наука и инновации. – 2021. – № 3. – С. 4–10.
17. Optimization of management zone delineation for precision crop management in an intensive farming system / Y. Yuan, B. Shi, R. Yost [et al.] // Plants. – 2022. – Vol. 11, № 19. – Art. ID 2611. <https://doi.org/10.3390/plants11192611>

18. Васьчула, А. В. Точное земледелие в Республике Беларусь: состояние и перспективы / А. В. Васьчула, С. А. Антошук // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2019. – № 52. – С. 19–24.
19. An algorithm for polygon clipping, and for determining polygon intersections and unions / Y. K. Liu, X. Q. Wang, S. Z. Bao, M. [et al.] // Computers & Geosciences. – 2007. – Vol. 33, № 5. – P. 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.008>
20. Foster, E. L. Clipping simple polygons with degenerate intersections / E. L. Foster, K. Hormann, R. T. Popa // Computers & Graphics: X. – 2019. – Vol. 2. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cagx.2019.100007>
21. Weiler, K. Hidden surface removal using polygon area sorting / K. Weiler, P. Atherton // Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '77). – 1977. – P. 214–222.
22. Vatti, R. B. A generic solution to polygon clipping / R. B. Vatti // Communications of the ACM. – 1992. – Vol. 35, № 7. – P. 56–63. <https://doi.org/10.1145/129902.129906>
23. Greiner, G. Efficient clipping of arbitrary polygons / G. Greiner, K. Hormann // ACM Transactions on Graphics. – 1998. – Vol. 17, № 2. – P. 71–83. <https://doi.org/10.1145/274363.274364>
24. Колмыков, А. В. Основные тенденции динамики земельных ресурсов и планирование землепользования в Республике Беларусь / А. В. Колмыков, А. Н. Авдеев // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 1. – С. 152–161.
25. In pursuit of responsible innovation for precision agriculture technologies / M. Gardezi, D. T. Adereti, R. Stock, A. Ogunyiola // Journal of Responsible Innovation. – 2022. – Vol. 9, № 2. – P. 224–247. <https://doi.org/10.1080/23299460.2022.2071668>
26. Mgendi, G. Unlocking the potential of precision agriculture for sustainable farming / G. Mgendi // Discover Agriculture. – 2024. – Vol. 2. – Art. ID 87. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00078-3>
27. Система управления данными и программное обеспечение для комплексной оценки состояния биосферы / П. К. Шалькевич, Д. С. Лавникович, Ю. С. Городная, А. В. Чеменцова // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 92–99. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-92-99>
28. Shoja, E. GPU-based parallel algorithm for computing point visibility inside simple polygons / E. Shoja, M. Ghodsi // Computers & Graphics. – 2015. – Vol. 49. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.02.010>
29. Zhou, C. Performance evaluation of spatial indexing to identify polygon intersection / C. Zhou, M. Li // Geocarto International. – 2019. – Vol. 35. – P. 1–18. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1624987>

References

1. Lapa V. V., Tsybulka N. N., Rak M. V., Putyatin Y. V., Pirogovskaya G. V., Azarenok T. N., Seraya T. M. [et al.]. Basic measures to increase soil fertility of agricultural lands of the Republic of Belarus for 2021–2025 years. *Pochvovedenie i agrokimiia = Soil Science and Agrochemistry*, 2020, no. 2, pp. 7–25 (in Russian).
2. Lapa V. V., Smeyan N. I., Bogdevich I. M., Chernysh A. F., Rak M. V., Tsyganov A. R. [et al.] *Agrochemist Handbook*. Minsk, IVC Minfina, 2022. 260 p. (in Russian).
3. Bogdevich I. M., Lapa V. V., Tsybulka N. N., Rak M. V., Putyatin Y. V., Azarenok T. N. [et al.]. *Methodology of Large-Scale Agrochemical and Radiological Survey of Soils of Agricultural Lands of the Republic of Belarus*. Minsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry, 2020. 45 p.
4. Bogdevich I. M., Putyatin Y. V., Stanilevich I. S. Half a century of formation and optimization of agrochemical fertility indicators of arable and meadow soils of Belarus. *Pochvennye i zemel'nye resursy: traditsionnye i innovatsionnye podkhody k izucheniiu i upravleniiu: materialy Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 90-letiiu obrazovaniia kafedry pochvovedeniia i geoinformatsionnykh sistem BGU i 85-letiiu so dnia rozhdeniia d-ra geogr. nauk, prof. V. S. Anoshko* [Soil and land resources: traditional and innovative approaches to study and management: Proc. of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Department of Soil Science and Geoinformation Systems of BSU and the 85th anniversary of the birth of Doctor of Geogr. Sciences, Professor V. S. Anoshko]. Minsk, 2023, pp. 20–24 (in Russian).
5. Bogdevich I. M., Lapa V. V., Rak M. V., Putyatin Yu. V., Stanilevich I. S., Mikhailovskaya N. A. [et al.]. *Agrochemical Characteristics of Soils of Agricultural Lands of the Republic of Belarus (2017–2020)*. Minsk, Institute of System Researches in Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, 2022. 275 p. (in Russian).
6. Chernysh A. F. *Land Monitoring*. Minsk, Belarusian State University, 2010. 248 p. (in Russian).
7. Javed B., Cambouris A. N., Duchemin M., Ziadi N., Karam A. Management zone delineation: utilizing multiple data sources to minimize soil spatial variability in commercial potato fields under Prince Edward Island pedoclimatic conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 2025, vol. 105, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1139/cjss-2024-0019>
8. Nze Memiaghe J. D., Cambouris A. N., Duchemin M., Ziadi N., Karam A. Management zone delineation strategies for phosphorus fertilizer recommendations under a no-till field in Eastern Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 2025, vol. 105, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1139/cjss-2023-0088>
9. Perović V., Čakmak D., Jakšić D., Milanović M., Matić M., Pavlović D., Mitrović M., Pavlović P. Development and evaluation approach of soil quality in agricultural soils: Integrated system for a more reliable delineation of homogeneous management zones. *Applied Soil Ecology*, 2025, vol. 206, art. ID 105860. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105860>
10. Eneji A. E., Otie V., Isong A., Aki E., Akpan J., Adamu M., Offiong R., An P. Delineation of field management zones based on soil properties in the Sudan and Sahel savannas of northern Nigeria. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025, vol. 21, art. ID 101812. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101812>
11. Paulukonis E. A., Purucker S. T. Spatiotemporally derived agricultural field delineations for species effects assessments and environmental decision support. *Science of The Total Environment*, 2025, vol. 958, art. ID 177967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177967>

12. Kindeev A. L., Klebanovich N. V. Method of accounting soil-agrochemical potential for optimizing the structure of land use of the Volozhinsk district of the Republic of Belarus. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie = Lomonosov Soil Science Journal*, 2024, vol. 79. no. 2, pp. 63–72 (in Russian). <https://doi.org/10.55959/msu0137-0944-17-2024-79-2-63-72>
13. Lukin S. V., Kostin I. G., Malysheva E. S. Application of gis for agroecological monitoring of agricultural lands. *Agrokhimicheskii vestnik = Agrochemical Herald*, 2019, no. 4, pp. 8–13 (in Russian).
14. Shannon D. K., Clay D. E., Kitchen N. R. *Precision Agriculture Basics. ASA, CSSA, and SSSA Books*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2018. 272 p. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics>
15. Xiaohu Zhang, Li Jiang, Xiaolei Qiu, Jianxiu Qiu, Juan Wang, Yan Zhu. An improved method of delineating rectangular management zones using a semivariogram-based technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, vol. 121, pp. 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.016>
16. Myslyva T., Sheliuta B., Kutsayeva A. Precision technologies: World experience and prospects for Belarus. *Nauka i innovacii = Science and Innovations*, 2021, no. 3, pp. 4–10 (in Russian).
17. Yuan Y., Shi B., Yost R., Liu X., Tian Y., Zhu Y., Cao W., Cao Q. Optimization of management zone delineation for precision crop management in an intensive farming system. *Plants*, 2022, vol. 11, no. 19, art. ID 2611. <https://doi.org/10.3390/plants11192611>
18. Vashchula A. V., Antoshuk S. A. Precision agriculture in the Republic of Belarus: current state and prospects. *Mekhanizatsiia i elektrifikatsiia sel'skogo khoziaistva = Mechanization and Electrification of Agriculture*, 2019, no. 52, pp. 19–24 (in Russian).
19. Liu Y. K., Wang X. Q., Bao S. Z., Gomboši M., Žalik B. An algorithm for polygon clipping, and for determining polygon intersections and unions. *Computers & Geosciences*, 2007, vol. 33, no. 5, pp. 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.008>
20. Foster E. L., Hormann K., Pota R. T. Clipping simple polygons with degenerate intersections. *Computers & Graphics*, 2019, vol. 2, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cagx.2019.100007>
21. Weiler K., Atherton P. Hidden surface removal using polygon area sorting. *Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '77)*, 1977, pp. 214–222.
22. Vatti R. B. A generic solution to polygon clipping. *Communications of the ACM*, 1992, vol. 35, no. 7, pp. 56–63. <https://doi.org/10.1145/129902.129906>
23. Greiner G., Hormann K. Efficient clipping of arbitrary polygons. *ACM Transactions on Graphics*, 1998, vol. 17, no. 2, pp. 71–83. <https://doi.org/10.1145/274363.274364>
24. Kolmykov A. V., Avdeev A. N. Main trends in land resource dynamics and land-use planning in the Republic of Belarus. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2025, no. 1, pp. 152–161 (in Russian).
25. Gardezi M., Adereti D. T., Stock R., Ogunyiola A. In pursuit of responsible innovation for precision agriculture technologies. *Journal of Responsible Innovation*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 224–247. <https://doi.org/10.1080/23299460.2022.2071668>
26. Mgendi G. Unlocking the potential of precision agriculture for sustainable farming. *Discover Agriculture*, 2024, vol. 2, art. ID 87. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00078-3>
27. Shalkevich P. K., Lavnikov D. S., Gorodnaya Yu. S., Chementsova A. V. Data Management System and Software for Comprehensive Assessment of the State of the Biosphere. *Doklady BGUIR*, 2024, vol. 22, no. 4, pp. 92–99 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-92-99>
28. Shoja E., Ghodsi M. GPU-based parallel algorithm for computing point visibility inside simple polygons. *Computers & Graphics*, 2015, vol. 49, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.02.010>
29. Zhou C., Li M. Performance evaluation of spatial indexing to identify polygon intersection. *Geocarto International*, 2019, vol. 35, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1624987>

Информация об авторах

Шалькевич Павел Константинович — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси (ул. Казинца, 103, 220108, Минск, Республика Беларусь); доцент, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета (ул. Долгобродская, 23/1, 220070, Минск, Республика Беларусь). E-mail: p.k.shalkevich@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9212-2683>

Ероминоков Евгений Сергеевич — студент, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета (ул. Долгобродская, 23/1, 220070, Минск, Республика Беларусь). E-mail: erominok@3soft.by

Information about the authors

Pavel K. Shalkevich — Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of System Researches in Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus (103, Kazintsa Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus); Associate Professor, Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (23/1, Dolgobrodskaya Str., Minsk, 220070, Republic of Belarus). E-mail: p.k.shalkevich@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9212-2683>

Evgeniy S. Yeraminok — Student, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (23/1, Dolgobrodskaya Str., Minsk, 220070, Republic of Belarus). E-mail: erominok@3soft.by