

---

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ГЕОДАННЫХ**

---

**Петров Антон Александрович**, канд. техн. наук, доц.

**Попова Елена Витальевна**, д-р экон. наук, проф.

**Бальжанова Божена Маратовна**, маг.

**Маслакова Полина Ильинична**, маг.

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, ул. Калинина, 13, Краснодар, Россия, 350044; e-mail: petrov.a@kubsau.ru; popova.e@kubsau.ru; bozhena.balzhanova@gmail.com; polinka.maslakova@gmail.com

*Цель:* статья посвящена вопросам автоматизации и цифровизации проблем сельского хозяйства, проблеме сбора неупорядоченных геометок сельскохозяйственной техники, исследованию и реализации алгоритма генерации графов дорог в агропромышленном комплексе.

*Обсуждение:* в работе проводится исследование в области обработки навигационных данных, сбора геометок с сельскохозяйственной техники путем получения данных со спутника. Предложен метод обработки неупорядоченных геоданных и выделения из географических точек маршрутов сельскохозяйственной техники. Актуальность решения данной проблемы заключается в последующем использовании алгоритма генерации графа дорог по геометкам для решения таких проблем, как выявление и построение оптимальных маршрутов с достаточной точностью, мониторинга и анализа посевных площадей, создания цифровой карты местности. *Результаты:* авторами разработан алгоритм генерации графов дорог, рассмотрены проблемы сбора и обработки географических точек координат, предложен метод решения выявленных проблем, с детальным описанием всех шагов алгоритма, представлены успешные результаты его применения.

**Ключевые слова:** сельское хозяйство, алгоритм, дороги, маршруты, сельскохозяйственная техника, сельхозмашины.

DOI: 10.17308/meps.2021.12/2728

### **Введение**

Сельское хозяйство является важным направлением развития российской экономики. Его доля в формировании валового внутреннего продукта (ВВП) России составляет 4,5% на 2021 год. А в 2020 году Россия впервые

стала нетто-экспортером продовольствия, т. е. продала за границу больше продуктов, чем закупила. В эпоху автоматизации производства и цифровизации экономики использование цифровых технологий в сфере агропромышленного комплекса (АПК) является необходимой задачей для поддержания конкурентоспособности и активного развития [5]. Это задача является актуальной для реализации на уровне отдельных сельскохозяйственных предприятий, регионов и всей России. Цифровизация сельского хозяйства также обусловлена тенденцией глобальной цифровизации в целом и активно поддерживается и продвигается государством. Например, на основании Указа Президента №204 от 7 мая 2018 года «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» был создан Министерством сельского хозяйства РФ ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство». Его цель заключается в цифровой трансформации в сфере АПК путем активного внедрения и использования цифровых технологий для обеспечения технологического прогресса и роста производительности «цифровых» сельскохозяйственных предприятий в 2 раза к 2024 году. В начале октября 2021 года стало известно о разработанной Министерством сельского хозяйства РФ программе цифровизации агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса РФ до 2030 года.

Таким образом, для решения проблем транспортной логистики в АПК как внешней (например, транспортировка продукции на склады или заводы по их обработке и изготовлению), так и внутренней (например, перемещение сельскохозяйственной техники внутри агрохолдинга от гаража до полей и по полям) необходимо решить задачу генерации дорог для построения оптимальных маршрутов, проверки качества дорожного покрытия, эффективного мониторинга передвижения техники и так далее [3]. А для решения этой задачи необходимо определить способ получения геоданных о передвижении техники, выбрать устройства для их получения, выбрать метод обработки полученных данных. Все проблемы и задачи взаимосвязаны и требуют итерационного и комплексного решения. Далее в статье будут рассматриваться способы решения некоторых описанных выше задач для достижения цифровизации сельского хозяйства.

### **Методология исследования**

Современная политическая ситуация в виде санкций на ввоз отдельных видов сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия подтвердила важность для Российской Федерации такого сектора национальной экономики, как АПК, обеспечивающий продовольственную безопасность страны. Поэтому так важно и актуально минимизировать затраты на производство сельскохозяйственной продукции, чтобы для конечные продукты были доступнее и не существовало их дефицита потребителей, состоящих из населения РФ. В современном мире это возможно благодаря внедрению и использованию информационных технологий [7, 8].

Для разрабатываемой информационной системы, способствующей

цифровизации сельского хозяйства, необходимо решить задачу выбора очередности обработки полей внутри огромных сельских хозяйств определенной техникой [3]. Но для этого необходимо рассчитать, сколько нужно проехать конкретной технике от места базирования, либо от места предыдущей задачи до нового поля. Актуальность данной задачи заключается в том, что существующие готовые решения базируются на построении маршрутов по дорогам общего пользования, которые в большинстве своем имеют твердое покрытие и не берут в учет полевые дороги, которые могут изменяться в отличие от дорог общего пользования. Ввиду большой загруженности дорог общего пользования в определенные сезоны, которые могут совпадать с сезонами сбора урожая, некоторое расстояние можно преодолеть быстрее, используя для маршрута полевые дороги, несмотря на то, что они могут быть грунтовыми и неровными. Иногда некоторой сельскохозяйственной технике запрещено ездить по дорогам общего пользования, например, на автомагистралях нельзя находится транспорту, скорость которого составляет менее 40 км/ч, при этом для некоторой техники устанавливается максимальная скорость 30 км/ч, соответственно, передвигаться по автомагистралям такой технике запрещено. Поэтому было принято решение о создании графа дорог на базе геоданных [1, 2].

Для получения максимальной пользы от внедрения навигационной системы в агропромышленную отрасль, необходимо провести анализ и определить, для каких задач будет использована, и какая должна быть обеспечена точность определения координат. Помимо этого, необходимо брать во внимание технологии позиционирования.

Выделяют следующие способы определения координат:

1. В режиме реального времени.
2. При постобработке.

Когда определение координат происходит в реальном времени, информация о геолокации поступает непосредственно со снимков, во время съемки, следовательно появляется возможность контролировать движение и отслеживать траекторию объекта. В отличие от первого способа, при постобработке информация, получаемая на выходе, вначале поступает на сервер и проходит обработку специализированным программным обеспечением постобработки ГНСС-данных (ГНСС – Глобальные навигационные спутниковые системы) [1].

Способ получения «В режиме реального времени» позволяет моментально получать данные о перемещении объекта, следует учесть, что для наибольшей эффективности данного способа необходимо использовать источник дифференциальных коррекций. Такие источники выступают связующим звеном между меткой и спутником и служат уточняющим устройством более точной геопозиции объекта. Источником является базовый приемник, который расположен на точке с известными координатами, который осуществляет передачу на подвижный приемник (сельскохозяйственная техни-

ка с GPS-трекером). Это позволяет достичь буквально сантиметровой точности определения координат.

Существует 3 канала связи для передачи данных между базой и подвижным приемником:

1. УКВ-радио (УКВ-ультракоротковолновое радио) – необходим УКВ-модем. По такому каналу возможно обеспечить передачу поправок на расстояние от 5 до 30 км в зависимости от мощности модема. Преимуществом такого вида связи являются бесплатное использование и неограниченное количество подключаемых подвижных приемников, но очевидными недостатками выступают дорогостоящее оборудование, а также необходимость получения официального разрешения на использование частоты, что малоосуществимо.

2. Голосовая связь (CSD) позволяет обеспечивать связь на большие расстояния, но не далее 50-70 км, так как с увеличением расстояния увеличивается ошибка определения координат. В свою очередь необходим GSM-модем и SIM-карты с подключенной услугой передачи данных по голосовому каналу. Этот метод передачи данных осуществляется по голосовому каналу, подвижный приемник осуществляет «звонок» на стационарную базу, база отвечает на «звонок» и происходит передача корректирующей информации, причем тарификация поминутная. Существенные изъяны такого варианта – это отсутствие в некоторых районах покрытие сети GSM; не все операторы сотовой связи поддерживают услугу CSD; а также один GSM-модем может принимать одновременно только от одного подвижного передатчика.

3. Интернет. Наиболее распространенный способ связи для передачи поправок с приемников. Безусловно, приемники необходимо оборудовать GSM/GPRS-модемами и SIM-картами с возможностью выхода в сеть Интернет. Но также может отсутствовать в некоторых районах покрытие сетью Интернет. Современные сервисы дифференциальной коррекции позволяют определять координаты с дециметровой точностью и избавят потенциальный аграрный холдинг от использования Базового приемника или сети Базовых станций.

Помимо описанных выше каналов связи, существует несколько сервисов дифференциальной коррекции, например, RTX, Terrastar, Atlas [4]. С помощью наземных станций, расположенных по всему миру, эти сервисы предрасчитывают и посылают корректирующую информацию на свои гео-стационарные спутники. А за покупку платной подписки пользователю открывается доступ к поправкам прямо с этих спутников либо по сети Интернет.

Такой способ оптимален и, несомненно, удобен в случае невозможности самостоятельно организовать связь между стационарной базой и перемещающимися приемниками, не потеряв при этом точности определения координат.



Рис. 1. Схема системы дифференциальной коррекции

Таким образом, у некоторых клиентов на технике установлен GPS-трекер, который раз в некоторое количество секунд записывает свои координаты (и соответственно координаты техники), а также временной штамп, который берётся со спутника. Объем таких данных составляет порядка 300 млн записей для всех клиентов за 1 месяц [12].

Для решения данной задачи использовались следующие подходы:

1. Подход на основе упорядоченных данных.
2. Подход на основе неупорядоченных данных.
3. Вероятностный подход.

Подход на основе упорядоченных данных заключается в том, что точки геоданных, полученных с помощью GPS-трекеров, соединяются между собой по критерию времени внутри одного трекера. Так, появляется возможность отслеживать движение конкретной техники благодаря сортировке геоданных по времени. Однако система сбора данных таким образом не всегда работает стабильно по многим факторам, таким как: некорректная работа или выход из строя спутников, датчиков слежения или серверов. Результатами выхода одного или всех компонентов системы определения геолокации является полное отсутствие связи с устройством слежения или неверное геопозиционирование объекта. Поэтому при отображении маршрута на карте могут быть заметны очевидные отклонения или аномалии, то есть отрезки маршрута по несуществующим дорогам [7]. Из-за очевидного влияния таких аномалий на построении маршрута они должны быть исключены.

Подход на основе неупорядоченных данных. Данный подход предлагается использовать, чтобы избежать аномальных отрезков маршрута, построенного с помощью связи между точками по времени. Суть такого подхода заключается в построении связей между точками на основе их близости на карте. Этот подход тоже оказался неидеальным и при его применении возникла проблема неравномерного распределения точек. При сборе гео-

данных таким способом были установлены равные промежутки времени для записи точек, но разная сельскохозяйственная техника движется с разной скоростью, поэтому точки отстают друг от друга на неравномерное расстояние [10]. А главным фактором построения маршрута из набора несвязанных геометок является дистанция между ними, именно поэтому, очень трудно подобрать универсальную пороговую дистанцию, после которой точки можно считать связанными. Также при использовании такого подхода могут возникать ложные связи при близком расположении дорог, например, улицы небольшого города или даже станицы, или, наоборот, если техника проехала один раз по дороге с большой скоростью, то точки будут находиться слишком далеко друг от друга и алгоритм не сможет их связать.

Вероятностный подход включает в себя построение связей между геометками по времени, но при этом необходимо оценивать вес каждой связи на основе всех проездов по данной дороге. Тогда аномальные отрезки, которые возникают нерегулярно, будут создавать длинные единоразовые связи, которые можно будет исключить применением статистических инструментов [6].

Алгоритм.

1. С помощью GPS-трекеров было собрано  $N$ -количество точек на карте.

2. Случайным образом была выбрана точка  $A$  и выделена окружность, центром которой стала данная точка. Но для формирования графа учитывается только точка  $A$ , иначе граф будет слишком плотным.

3. Далее таким же случайным образом выбирается точка  $B$  с условием, что данная точка не попадает в окружность с центром в точке  $A$ . И строится новая окружность, центром которой является точка  $B$ .

4. Пункты 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не останется точек, которые не попадают ни в одну из проведенных окружностей.

5. Тем самым получается проредить  $N$ -количество точек и выбрать только определенные пять точек:  $A, B, B, G, D$ .

6. Если выбрать точки, лежащие внутри окружности точки  $A$ , то окажется, что они связаны с точками:

- лежащими внутри окружности точки  $B$ ;
- лежащими внутри окружности  $G$ ;
- лежащими внутри самой окружности точки  $A$ .

7. Данная связь образуется между точками, принадлежащими одной технике по времени.

8. Следовательно, если точки внутри двух окружностей связаны по времени или точка принадлежит двум окружностям, то между такими окружностями можно установить связь.

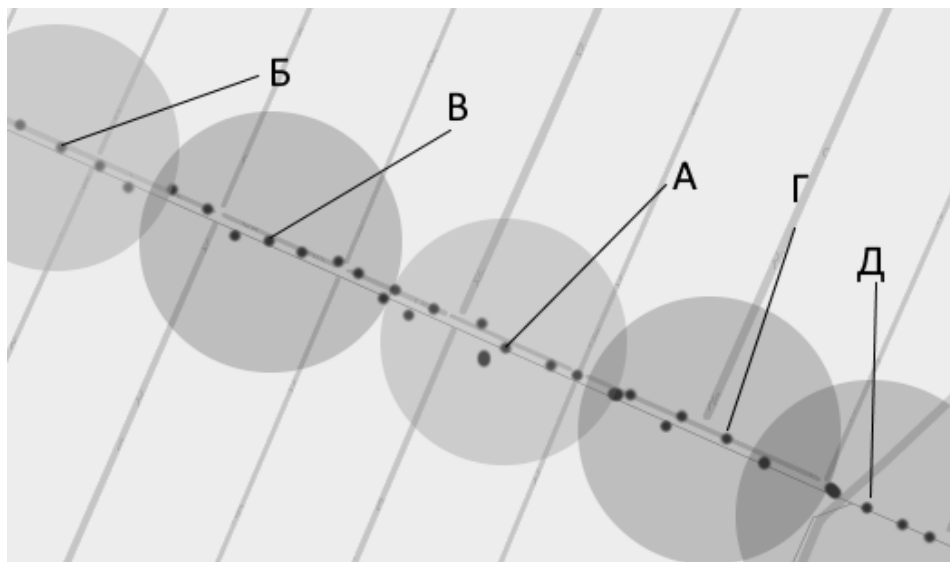


Рис. 2. Пример карты с геометками

9. Предполагается, что на данном участке было совершено три проезда разной техники, тогда связи между окружностями будут выглядеть следующим образом.

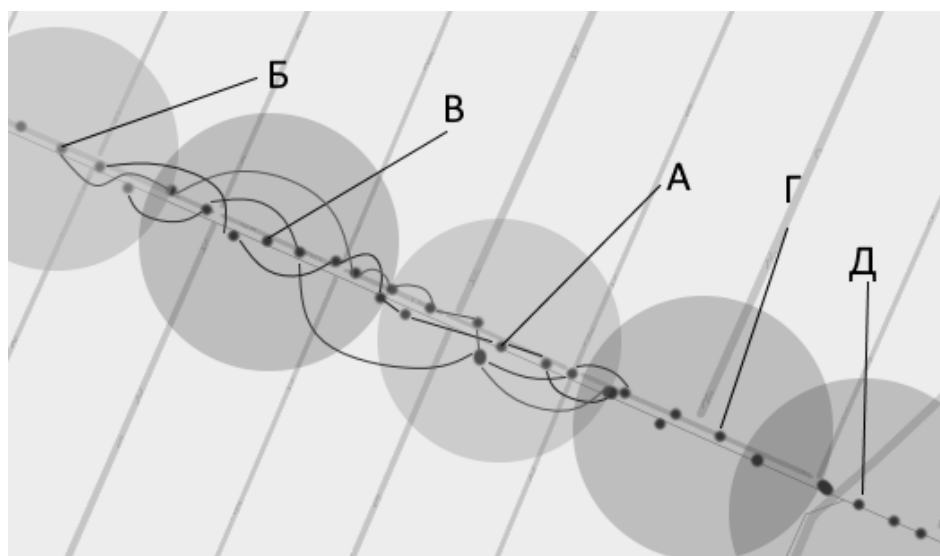


Рис. 3. Маршруты следования каждого вида техники

10. Окружности А и В имеют три связи в нормальных условиях. То есть данные окружности можно считать связанными.

11. Связь следует считать аномальной, если она будет одна и ее дли-



на будет аномально большой. При этом ее вес будет достаточно низким относительно других связей. Такую связь необходимо исключить.

12. После удаления лишних связей необходимо проверить следующие утверждения:

а) три подряд связанные точки лежат приблизительно на одной прямой.

б) средняя точка имеет связи только с двумя соседями.

13. При подтверждении описанных выше утверждений средняя точка удаляется, так как не предоставляет никакой значимой информации, а связь возникает между ее соседями. Таким образом, граф становится еще реже.

14. Следующим шагом удаляются все точки внутри полей, а ближайшим к полю токам присваивается идентификационный номер поля.

15. Заключительным пунктом полученные точки связи складываются в формальный двунаправленный граф, где все ребра являются расстояниями между точками.

### **Обсуждение результатов**

В рамках проведения данного исследования был разработан алгоритм генерации графов дорог для сельскохозяйственной техники, который позволяет решить задачу выбора очередности обработки полей внутри хозяйства с помощью определенной сельхозтехники, а также рассчитать расстояние, которое необходимо преодолеть машинам от их места базирования или от места выполнения предыдущей задачи до нового поля [11]. Рассмотрено несколько способов решения данной задачи и выбран наиболее удовлетворяющий всем требованиям подход, а именно вероятностный. В результате применения разработанного алгоритма получилось отследить и выбрать только релевантные точки, на основании которых был сгенерирован максимально точный маршрут прохождения сельхозмашин по различным дорогам. Полученный маршрут представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Результат применения алгоритма

На представленном рисунке отражен результат работы алгоритма, в более темных местах заметно, что техника осуществляла максимальное ко-



личество проездом, следовательно, можно сделать вывод о том, что в таких местах находятся поля, а в менее выделенных областях дороги, по которым осуществляла движение сельскохозяйственная техника.

На рисунке 5 показан результат работы разработанного алгоритма в условиях полевых дорог.



Рис. 5. Построенный граф дорог для полевых условий

Из рисунка 5 видно, что алгоритм выполняет построение оптимальных маршрутов в окрестностях сельскохозяйственных полей. Это позволяет строить более точные маршруты, огибающие собственную геометрию сельскохозяйственного поля.

### **Заключение**

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет решить рассмотренную задачу формирования оптимальных маршрутов сельскохозяйственной техники на основе исторических геоданных, что позволит значительно сократить временные и финансовые затраты при производстве сельскохозяйственной продукции, а также поможет максимально прозрачно и точно отслеживать работу водителей сельхозмашин. Разработанный алгоритм внедрён в информационную систему цифровизации сельского хозяйства и решает ряд производственных задач автоматизации, таких как: выявление предположений о качестве дорог в зависимости от скорости прохождения по ним сельскохозяйственной техники, на основе данных сторонних сервисов маршрутизации выявляет полевые дороги. Для разработанного алгоритма существует множество различных вариантов применения, а также его можно использовать в связке с другими алгоритмами для получения более качественных и точных маршрутов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богданов М.Р. *Применения GPS/ГЛОНАСС: учебное пособие*. Долгопрудный, Издательский Дом «Интеллект», 2012.
2. Пиляев С.Н. *Автоматизация технологических процессов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия»* / С.Н. Пиляев, Д.Н. Афоничев, В.А. Черников. Воронеж, Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра Первого, 2016.
3. Сагадеева М.А. *Теория графов: учебное пособие*. 2-е изд. Челябинск, Саратов, Южно-Уральский институт управления и экономики, Ай Пи Эр Медиа, 2019.
4. Стратегия развития аграрной сферы экономики. Проблемы и пути решения: сборник статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции, 31 мая – 2 июня 2017 г., г. Краснодар / Э.Ф. Аслямова, З.А. Галин, Г.Н. Барсукова [и др.]; под редакцией А. И. Трубилин [и др.]. Краснодар, Научный консультант, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017.
5. Aldous, David J. and Karthik Ganesan. True scale-invariant random spatial networks // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no. 110 (2013), pp. 8782-8785.
6. Alkan Muhammet and Musa Aydin. Simulation and Comparison of Pathfinding Algorithms using Real Turkey Data // 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), 2018, no. 1-4.
7. Andrić Gušavac, Bisera et al. Optimal treatment of agricultural land – special multi-depot vehicle routing problem // *Agricultural Economics-zemedelska Ekonomika*, 2019, no. 65, pp. 569-578.
8. J. Huang et al. Automatic Generation of Road Maps from Low Quality GPS Trajectory Data via Structure Learning, in *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 71965-71975.
9. Qiu Jia & Wang Ruisheng. (2016). Automatic Extraction of Road Networks from GPS Traces // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, no. 82, pp.593-604.
10. Spekken Mark and Sytze de Bruin. Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time // *Precision Agriculture*, 1411.
11. Yu Xiao. Research on the Distribution Route Optimization of Agricultural Product Logistics Based on Particle Swarm // *Logistics Engineering and Management*, 2013: n. pag.
12. Wu Yangxin et al. Bidirectional Graph Reasoning Network for Panoptic Segmentation // *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 9077-9086.

---

# DEVELOPMENT OF ROAD GRAPHS BASED ON GEODATA TO SUPPORT DECISION-MAKING ON THE ORDER OF PROCESSING FIELDS WITHIN THE FARM WITH CERTAIN AGRICULTURAL MACHINERY

---

**Petrov Anton Alexandrovich**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

**Popova Elena Vitalyevna**, Dr. Sc. (Econ.), Prof.

**Balzhanova Bozhena Maratovna**, M.S. stud.

**Maslackova Polina Ilinichna**, M.S. stud.

Kuban state agrarian University, named after I. T. Trubilin, Kalinina, 13, Krasnodar, Russia, 350044; e-mail: petrov.a@kubsau.ru; popova.e@kubsau.ru;bozhena.balzhanova@gmail.com; polinka.maslakova@gmail.com

*Purpose:* the article is devoted to the issues of automation and digitalization of agricultural problems, the problem of collecting disordered geo-tags of agricultural machinery, the study and implementation of an algorithm for generating road graphs in the agricultural sector. *Discussion:* the research is carried out in the field of navigation data processing, collection of geo-tags from agricultural machinery by obtaining data from a satellite. A method for processing disordered geo-data and extraction of agricultural machinery routes from geographical points is proposed. The urgency of solving this problem lies in the subsequent use of the algorithm for generating a road graph by geotags to solve problems such as identifying and building optimal routes with sufficient accuracy, monitoring and analyzing cultivated areas, and creating a digital map of the area. *Results:* the authors developed an algorithm for generating road graphs, considered the problems of collecting and processing geographical points of coordinates, proposed a method for solving the identified problems, with a detailed description of all steps of the algorithm, presented the successful results of its application.

**Keywords:** agriculture, algorithm, roads, routes, agricultural machinery, agricultural machinery.

## References

1. Bogdanov M.R. *Primeneniya GPS/GLONASS* [Applications of GPS/GLONASS : a textbook. Dolgoprudny, Publishing House «Intellect», 2012. (In Russ.)
2. Pilyaev S.N. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov* [Automation of technological processes: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction of 35.03.06 «Agroengineering»] / S.N. Pilyaev, D.N. Afonichev, V.A. Chernikov. Voronezh, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 2016. (In Russ.)
3. Sagadeeva M.A. *Teoriya grafov* [Graph theory: a textbook / M.A. Sagadeeva]. – 2nd ed. Chelyabinsk, Saratov, South Ural Institute of Management and Economics, AI Air Media, 2019. (In Russ.)
4. Strategiya razvitiya agrarnoy sferi

economici [Strategy for the development of the agricultural sector of the economy. Problems and solutions: a collection of articles based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference], May 31 – June 2, 2017, Krasnodar / E.F. Aslyamova, Z.A. Galin, G.N. Barsukova [et al.]; edited by A. I. Trubilin [et al.]. Krasnodar, Scientific consultant, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2017. (In Russ.)

5. Aldous David J. and Karthik Ganesan. "True scale-invariant random spatial networks». Proceedings of the National Academy of Sciences, 110 (2013), pp. 8782-8785.

6. Alkan Muhammet and Musa Aydin. «Simulation and Comparison of Pathfinding Algorithms using Real Turkey Data.» *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, (2018), pp. 1-4.

7. Andrić Gušavac, Bisera et al. «Optimal treatment of agricultural land – special multi-depot vehicle routing problem». *Agricultural Economics-*

*zemedelska Ekonomika*, 65 (2019), pp. 569-578.

8. J. Huang et al. «Automatic Generation of Road Maps from Low Quality GPS Trajectory Data via Structure Learning» in *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 71965-71975.

9. Qiu Jia & Wang Ruisheng. (2016). Automatic Extraction of Road Networks from GPS Traces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, no. 82, pp. 593-604.

10. Spekken Mark and Sytze de Bruin. «Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time.» *Precision Agriculture*, no. 14 (2012), pp. 224-244.

11. Yu Xiao. «Research on the Distribution Route Optimization of Agricultural Product Logistics Based on Particle Swarm». *Logistics Engineering and Management*, (2013): n. pag.

12. Wu Yangxin et al. «Bidirectional Graph Reasoning Network for Panoptic Segmentation». *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (2020), pp. 9077-9086.