

На правах рукописи

Мохаммад Навар

**МАРШРУТИЗАЦИЯ ДАННЫХ В ГЕТЕРОГЕННОЙ  
БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» на кафедре интеллектуальных систем в управлении и автоматизации.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Воронова Лилия Ивановна**

Официальные  
оппоненты: **Кучерявый Евгений Андреевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Московский институт  
электроники и математики им. А.Н. Тихонова,  
профессор

**Мутханна Аммар Салех Али**,  
кандидат технических наук,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
кафедра сетей связи и передачи данных,  
доцент кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени  
Российский научно-исследовательский институт  
радио имени М. И. Кривошеева»,  
г. Москва

Защита состоится 26 июня 2024 года в 16.00 на заседании  
диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-  
Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу  
Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 26 апреля 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 55.2.004.01,  
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время разработка и внедрение новых систем и устройств, содержащих элементы искусственного интеллекта, во все области народного хозяйства является приоритетным научным направлением. XXI век – это век интернета вещей (ИВ), как промышленного, так и социально-бытового, с повсеместным применением линейки методов и технологий интеллектуального анализа данных.

В архитектуре ИВ выделяют четыре уровня: уровень сенсоров и сенсорных сетей, уровень шлюзов и сетей, сервисный уровень и уровень приложений. Базовым уровнем являются низкоскоростные беспроводные сенсорные сети (БСС), основанные на нескольких стандартах. На сегодняшний день беспроводные сенсорные сети (БСС) позволяют собирать и передавать данные в Интернете вещей (IoT – Internet Of Things) и широко используются в различных областях, таких как военная, промышленная, сельскохозяйственная, экологическая, транспортная, социальная и медицинская. БСС относятся к типу повсеместных сетей, обеспечивающих непрерывную связь и доступ к информации в любое время и в любом месте.

Технологический прогресс, связанный в том числе и с применением методов интеллектуального анализа данных, привел к появлению новых типов БСС, таких как летающие сети, роевая робототехника, тактильный интернет, интеллектуальные телекоммуникационные услуги. В разных странах, в том числе и в Сирийской Арабской Республике рассматривается задача применения современных беспроводных сенсорных сетей в социально-экономической сфере, в частности в сельском хозяйстве, решение которой затруднено географическими особенностями горной местности. В этой связи перспективно применение гетерогенных сетей, интегрирующих сегменты наземной сети со стационарными сенсорными узлами с беспроводными датчиками с воздушной сетью беспилотных летательных аппаратов малой стоимости для передачи данных на большие расстояния для обработки на базовую станцию.

В связи с ограниченностью ресурсов БСС, включая мощность, память и скорость передачи данных, непосредственно влияющие на разработку протоколов и алгоритмов, используемых в БСС, выбор способа организации передачи информации является одной из основных научных проблем при проектировании БСС.

Для повышения эффективности БСС и улучшения показателей качества обслуживания QoS целесообразно исследовать применение современных интеллектуальных технологий, которые позволят выполнять передачу информации в распределённых сетях даже в случаях их частичной деградации или нарушения целостности. В соответствии с концепцией «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» на период до 2030 года, экономика переходит к

повсеместному отраслевому внедрению ИИ в приоритетных отраслях, в том числе в сельском хозяйстве, промышленности, инновационно-коммуникационных технологиях. В этой связи задача исследования и разработки интеллектуальных методов и алгоритмов эффективной кластеризации и маршрутизации БСС является актуальной и практически значимой.

Основные направления диссертационного исследования связаны с применением методов интеллектуального анализа данных с целью улучшения характеристик передачи данных и показателей качества в гетерогенной беспроводной сенсорной сети, включающей наземный сегмент со стационарными сенсорными узлами и летающую сеть, что является крайне актуальной задачей при мониторинге и контроле зон покрытия с использованием интернета вещей в труднодоступной горной местности в Сирии.

**Объектом исследований** являются гетерогенные беспроводные сенсорные сети и показатели качества их функционирования, а **предметом исследований** – методы и алгоритмы кластеризации и маршрутизации данных в гетерогенной беспроводной сети с использованием интеллектуального анализа данных.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время исследования в области беспроводных сенсорных сетей как основы Интернета Вещей активно ведутся в Российской Федерации. Они представлены в работах А.С. Аджемова, А.Е. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, В.П. Волчкова, В.А. Нетеса, А.И. Парамонова, Л.О. Мыровой, С.Н. Степанова, М.С. Степанова, С.С. Шаврина, К.Е. Самуйлова, А.В. Рыжкова, В.Б. Крейнделина, А.В. Прокопьевой, В.А. Мочалова, Мутханны А.С.А. и многих других. Наиболее значимые работы, посвящённые маршрутизации данных в беспроводных сенсорных сетях принадлежат таким учёным как: Е.Ю. Голубничая, Д.В. Окунева, С.С. Махров, К.А. Муравьев, В.М. Sahoo, P. Nayak, W.R. Heinzelman, M.A. Alsheikh. Наиболее значимые работы, посвящённые маршрутизации данных в летающих сенсорных сетях принадлежат таким учёным как: А.Е. Кучерявый, Р.В. Киричек, А.В. Леонов, М.У. Arafat, S.I. Han, Y.N. Han.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью работы является повышение эффективности БСС за счет применения методов и алгоритмов интеллектуального анализа при сборе и маршрутизации данных в гетерогенной БСС, объединяющей наземную сеть со стационарными сенсорными узлами и летающую сенсорную сеть.

Для достижения цели в настоящей работе решены следующие задачи:

1. Проведено исследование методов, алгоритмов и реализующих их программных средств, связанных с QoS БСС. Разработан формализм математической модели гетерогенной БСС, обеспечивающий эффективную обработку и передачу трафика в разных сегментах сети.

2. Разработан и исследован метод эффективной кластеризации в наземной БСС, обеспечивающий нахождение и распределение оптимального количества кластеров и маркировку головных кластерных узлов (ГКУ).

3. Разработан и исследован протокол эффективной маршрутизации данных с применением методов интеллектуального анализа, улучшающий показатели QoS гетерогенной сенсорной сети.

4. Разработан программный комплекс с удаленным доступом для моделирования обработки и передачи данных в гетерогенной БСС и исследования эффективности применения используемых методов и моделей.

**Научная задача.** Разработка эффективных методов передачи данных на большие расстояния в гетерогенной модели, состоящей из наземной беспроводной сенсорной сети и роя беспилотных летательных аппаратов. Эти методы направлены на снижение энергопотребления, увеличение времени жизни сети и производительности наземной беспроводной сенсорной сети, а также на быструю передачу данных через рой БПЛА на базовую станцию для обработки, что имеет большое практическое значение для развития современных систем связи и их внедрения в широких масштабах.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработанная имитационная модель гетерогенной беспроводной сенсорной сети, включающая методы интеллектуального анализа данных, позволяет проводить комплексное моделирование и исследование показателей качества сети, автоматическую передачу данных между сегментами сети и видами агрегации данных.

2. Разработанный метод эффективной кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием модифицированного алгоритма K-средних, с учетом зон радиовидимости и GPS-координат узлов позволяет оптимизировать количество кластеров и избежать «скученности» ГКУ в малой области зоны покрытия, сокращая временные затраты на обработку информации в наземном шлюзе.

3. Предложенная методика маршрутизации данных для наземного сегмента БСС с использованием нейронной сети Хопфилда, с учетом энергоэффективности сенсорных узлов позволяет найти кратчайший путь, проходящий через все ГКУ к наземному шлюзу, снижая энергопотребление сенсорных узлов и увеличивая время жизни сети по сравнению с другими протоколами в зависимости от расположения шлюза: в случае базовая станция (БС) вне сенсорного поля время жизни сети увеличивается на 52% по сравнению с протоколом LEACH и на 45% по сравнению с протоколом ILEACH; в случае БС внутри сенсорного поля на 45% по сравнению с протоколом LEACH и на 6% по сравнению с протоколом ILEACH.

4. Разработанная методика скоростной маршрутизации данных для летающего

сегмента сети (рой БПЛА) с использованием генетического алгоритма, учитывающая динамическое расположение дронов и их зоны радиовидимости, позволяет за доли секунды найти кратчайший путь между беспилотниками при динамическом изменении топологии сети и его отправку на наземный шлюз для передачи собранных данных с наземного сегмента на базовую станцию.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** *Теоретическая значимость* работы заключается в разработке комплексной модели обработки и передачи данных от наземных беспроводных сенсорных узлов к базовой станции и через рой дронов/БПЛА с использованием интеллектуальных методов, обеспечивающих высокую эффективность расчетов и получение адекватных результатов. Кроме того, предложенные методы кластеризации узлов в БСС и выбора головных кластерных узлов в разработанной модели на основе матрицы радиовидимости и местоположения узлов, позволяют провести агрегацию и сжатие данных для снижения нагрузки на базовую станцию.

*Практическая значимость.* Разработка протокола передачи данных между узлами наземной БСС с использованием интеллектуальных методов К-средних и нейронной сети Хопфилда увеличивает время жизни сети, использование кластеризации в процессе маршрутизации данных помогает снизить энергопотребление, а разработка интеллектуальных алгоритмов маршрутизации через рой БПЛА позволяет передавать данные на удаленную базовую станцию с труднодоступных сенсорных полей.

Результаты диссертации, в том числе программный комплекс для моделирования гетерогенной БСС используется в учебном процессе на кафедре «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации» МТУСИ. Реализация результатов работы подтверждена соответствующим актом.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы теории графов, математического моделирования, искусственных нейронных сетей, генетического алгоритма и К-средних. инженерии программного обеспечения. Для апробации алгоритмов использовался язык программирования Python в среде Anaconda, с библиотеками Pandas, NumPy, Sklearn, Matplotlib, ipywidgets, Mercury.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработана комплексная модель гетерогенной беспроводной сенсорной сети, объединяющая структурно-функциональную модель, математические модели кластеризации и маршрутизации, сформированные с применением интеллектуальных методов, которая обеспечивает эффективную обработку данных и получение более высоких показателей качества сети, по сравнению с другими моделями.

2. Разработан метод эффективной кластеризации наземного сенсорного поля

гетерогенной сети, обеспечивающий расчет оптимального количества кластеров и их рациональную топологию исключая «скупенность» ГКУ в малой области, обеспечивающий стабильность работы и сокращающий временные затраты на обработку информации в наземном шлюзе по сравнению с другими подходами.

3. Разработан обобщенный протокол маршрутизации для гетерогенной БСС на основе структуры пакетов данных, объединяющий сценарии 1) сбора данных со всех ГКУ наземной части, увеличивающий время жизни сети и снижающий потребление энергии в среднем в 1,3 раза по сравнению с другими протоколами и 2) построения кратчайшего пути в летающей части при динамическом изменении топологии сети со скоростным доступом к базовой станции.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов обеспечивается адекватностью используемых математических методов, верификацией математических моделей в комплексной модели гетерогенной БСС путем компьютерного моделирования. Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами на научных конференциях.

Основные результаты работы подтверждены и обсуждены на конференциях: Молодёжный научный форум МТУСИ «Телекоммуникации и информационные технологии» (Москва, 2020, 2024); Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» (Москва, 2021, 2022, 2024); VI международная научно-практическая конференция «Менеджмент качества, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии» IT&QM&IS (Ярославль, 2021); International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology, and Agriculture (RSE 2022) (Dushanbe, Republic of Tajikistan, 2022); 2024 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, IEEE, IRIS (Moscow, 2024); The 35th Conference of the Open Innovations Association FRUCT (Tampere, Finland, 2024).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, в том числе публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки Российской Федерации (2 работы), в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах, в т.ч. Scopus (3 работы), статьи и материалы конференций (3 работы), а также свидетельства о регистрации ПО (3 работы). Всего опубликовано 11 работ.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует п. 1, 2, 5, 8 и 11 паспорта научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

**Личный вклад.** В опубликованные научные труды диссертантом внесен основной вклад, касающийся разработки методов, алгоритмов и их реализации. Вклад

соавторов ограничивался постановкой задач на исследования и обсуждением результатов.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 133 страниц с 66 рисунками и 21 таблицами. Список литературы содержит 155 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи; определены объект, предмет и методы исследования; раскрыты научная новизна, практическая значимость работы, её апробация, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены показатели качества обслуживания (QoS) для беспроводных сетей, проанализированы работы, в которых использовались методы кластеризации и маршрутизации для достижения высоких показателей качества обслуживания. Отмечено, что для исследуемой модели БСС наиболее важными показателями являются время жизни сети и энергопотребление. Проанализированы разные подходы к классификации протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, основанные на разных параметрах и критериях.

Рассмотрены особенности структуры БСС, типы протоколов БСС, и показатели функционирования сети БСС, связанные со стеком протоколов БСС.

Рассмотрены сенсорные сети с изменяемой топологией Ad-hoc (мобильные целевые сети MANET, автомобильные целевые сети VANET, летающие целевые сети FANET) и развитие летающих сенсорных сетей, проанализированы технологии передачи данных, используемых при построении гетерогенных БСС (Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi, Z-Wave, WirelessHART, 6LoWPAN, Wavenis, LoRa, SigFox и WiMAX).

Рассмотрены сетевые системы моделирования беспроводных сенсорных сетей: GloMoSim/QualNet, OPNET Modeler Wireless Suite, OMNeT++, NS-2, Avrora, J-Sim, J-Sim, EmStar, SENS, SENSE, Shawn, и CupCarbon. Показано, что перечисленные системы, написанные на языке C++, имеют ограниченный интерфейс, в них заложены предопределенные протоколы, ограничивающие модификацию и возможность применения для задач, связанных с обработкой трафика с помощью интеллектуальных методов.

**Во второй главе** рассмотрены алгоритмы маршрутизации в БСС на основе машинного обучения отмечается интерес исследователей к разработке новых методов и структур, связанных с беспроводными сенсорными сетями, в том числе с опорой на методы интеллектуального анализа данных для принятия оптимальных решений по



маршрутизации данных. Исследованы методы интеллектуального анализа данных, пригодные для обработки трафика в гетерогенной БСС.

Рассмотрен базовый формализм, лежащий в основе моделей нейронных сетей. Приведены краткие описания современных архитектур нейронных сетей, в том числе *Нейросети прямого распространения*, *Глубокие нейронные сети*, *Рекуррентные нейронные сети*, в том числе *Сети долговременной/кратковременной памяти (Long/short term memory networks, LSTM)*, *Сверточные нейросети*, со сравнением базовых характеристик наиболее актуальных архитектур, *Генеративные состязательные сети* и др. Рассмотрены методы позволяющие реализовывать кластеризацию (К-средних), классификацию и регрессию *Случайный лес (RF - Random Forest)*, *Support Vector Machine (SVM)* и маршрутизацию *Генетический алгоритм*.

Приведена методика выбора методов ИАД для кластеризации БСС, а также рассмотрен подход к выбору оптимального количество кластеров, на основании ряда параметров для разных уровней: уровень радиомодели, уровень сети, уровень кластеризации. Приведены формулы выбора оптимального количества кластеров.

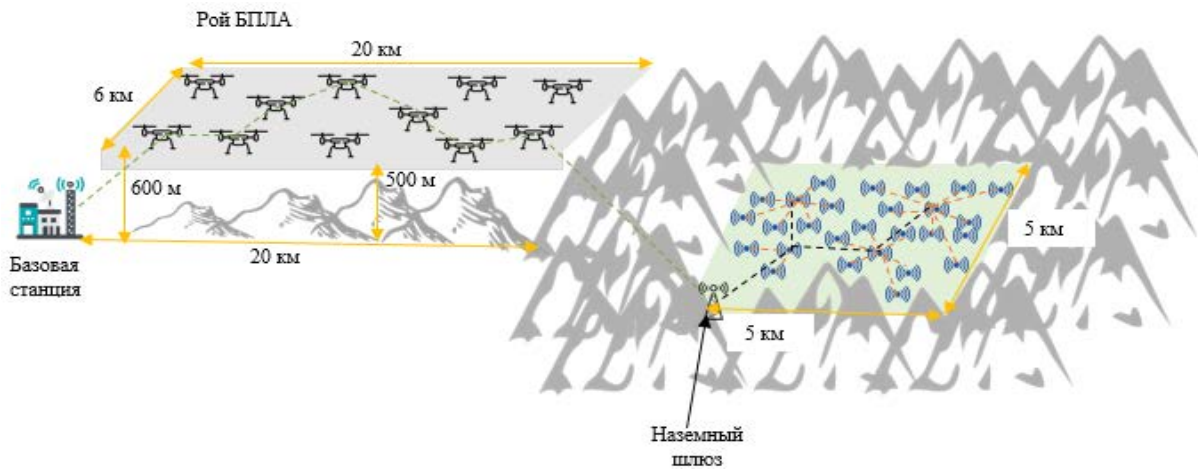
Предложены сценарий работы протокола маршрутизации в гетерогенной беспроводной сенсорной сети, а также структуры пакетов данных для этого протокола.

**В третьей главе** на основе топологии исследуемого региона в Сирийской Арабской Республике разработана гетерогенная модель беспроводной сенсорной сети, включающая две части: наземную беспроводную сенсорную сеть и летающую сенсорную сеть. Данная модель позволяет исследовать труднодоступную горную местность и передавать данные на удаленную базовую станцию для обработки, как показано на рисунок 1(а). Модель гетерогенной БСС исследуется для применения в для горной сельскохозяйственной территории в Сирии с размерами  $S_1 = (5*5) = 25 \text{ км}^2$  и с «коридором» для БПЛА  $S_2$  длиной  $L = 20 \text{ км}$ ,  $D = 6 \text{ км}$  в слое над землёй высотой между 500 и 600 м.

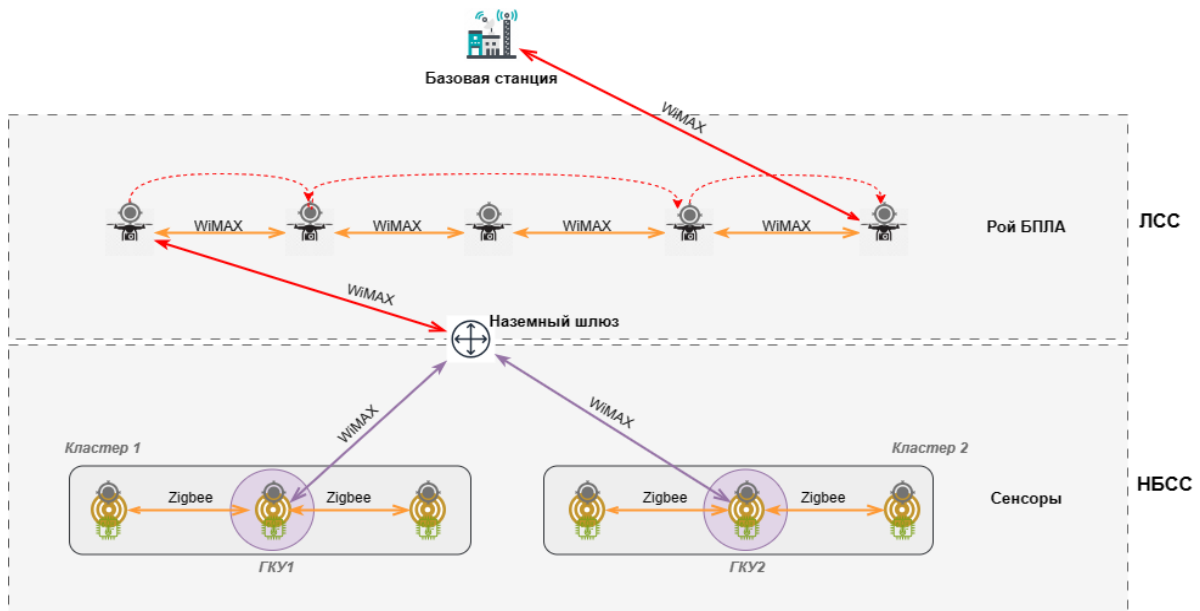
Структура гетерогенной модели БСС, используется для передачи данных на большие расстояния, содержит два сегмента как показана на рисунке 1(б).

*Наземная часть (НБСС)* — это сеть беспроводных стационарных датчиков, которая состоит из большого количества самоорганизующихся коммуникативных групп множества различных датчиков с низким энергопотреблением, которые следят за состоянием земли, сельскохозяйственных культур и лесных массивов. В пределах НБСС случайным образом размещаются датчики, измеряющих углекислый газ, влажность почвы, температуру, влажность воздуха и количество осадков, и каждый датчик оснащен блоком GPS (Global Positioning System) для определения своего местоположения. Эти датчики группируются в кластеры, и в каждом кластере есть головной кластерный узел (ГКУ), который отправляет данные на наземный шлюз.

Наземный шлюз собирает данные со всех ГКУ, инкапсулирует их и отправляет на ближайший БПЛА в воздушной части. Для передачи данных между сенсорами используется IEEE 802.15.4 и протокол, использующий эту технологию: Zigbee, который обеспечивает скорость передачи от 20 до 250 кбит/с на расстояние 1 до 100 м.



а)



б)

Рисунок 1 – Модель для гетерогенной беспроводной сенсорной сети:

а) визуальная модель ситуации в реальности, б) структура гетерогенной модели БСС

*Воздушная часть (ЛСС)* — это летающая сенсорная сеть, которая представляет собой рой БПЛА, через который передаются данные по кратчайшему пути от наземного шлюза к базовой станции (БС). В воздушном коридоре в фиксированных непересекающихся областях перемещаются 10 дронов/БПЛА. Каждый БПЛА оснащен блоком GPS для определения своего местоположения во время полета и имеет радиовидимость 2000 метров. В качестве технологии передачи данных между роем БПЛА используется IEEE 802.16e. Протокол, использующий эту технологию: WiMax, который обеспечивает скорость передачи до 40 Мбит/с на расстояние 1 до 5 км.

В модели учитывается динамическое движение дронов, поскольку их положения меняются с течением времени, поэтому матрицы радиовидимости сети БПЛА, полученные в разные моменты времени  $t$  могут отличаться.

Разработанная, исходя из физических свойств гетерогенной сети структура пакета данных, зависит от сценария работы алгоритма на основе протокола маршрутизации. Описание полей в структуре пакета позволяет в рамках компьютерного эксперимента изучить характеристики протокола маршрутизации.

Для исследования возможности кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием матрицы реализованы и проанализированы два алгоритма; первый – объединяющий нейронную сеть Кохонена с Конструктивным методом и второй – алгоритм К-средних. При работе первого алгоритма не удается однозначно определить оптимальное количество кластеров. Недостатки второго базового алгоритма К-средних связаны с необходимостью задания исходного количества кластеров вручную и случайной инициализацией их центров, которая может привести к неудовлетворительным результатам.

Для устранения этих недостатков и повышения эффективности кластеризации алгоритм К-средних модифицирован следующим образом.

- Этап 1. Исходное количества кластеров предлагается определять с помощью формулы (1), исходя из формы поля зондирования (квадратное поле), модели радиосвязи (свободное пространство) и количества узлов, распределенных в зоне зондирования.

$$K_{opt} = \sqrt{\frac{3*N}{\pi}} = 0.977 * \sqrt{N}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество узлов.

- Этап 2. Недостаток случайной инициализации центров кластеров (ГКУ) устраняется путем нахождения начальных виртуальных точек центров кластеров по окружности, центр которой является середина сенсорного поля, в соответствии с формулой (2):

$$\theta = \frac{2 * \pi}{K_{opt}},$$

$$X_{ГКУ} = R * \cos(\theta * k), \quad k = 1, \dots, K_{opt}, \quad R = \frac{L}{4}, \quad (2)$$

$$Y_{ГКУ} = R * \sin(\theta * k),$$

где  $K_{opt}$  – оптимальное количество кластеров;  $L$  – длина сенсорного поля;  $\theta$  – угол, определяющий расстояние между ГКУ на окружности;  $R$  – радиус окружности, равный четверти длины сенсорного поля. Этот подход позволяет избежать «скученности» ГКУ в малой области зоны покрытия. Для определения узлов ГКУ необходимо найти узлы, ближайšie к точкам центра каждого кластера. Затем в каждом

кластере необходимо убедиться, что все узлы в кластере находятся в зоне действия узла ГКУ.

- Этап 3. Определение узлов, принадлежащих к каждому кластеру:

$m$  – число узлов;  $K_{opt}$  – кол-во кластеров; координаты узлов  $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(i)}, \dots, x^{(m)}) \in R^n$ ;

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k \in R^n$  – центры кластеров;  $c^{(i)} \in C$  – вектор узлов, содержащий номер кластера, к которому принадлежит каждый узел.

Повторить {

For  $i = 1$  to  $m$

$c^{(i)}$  = индекс (от 1 до  $K_{opt}$ ) центра кластера, ближайшего к  $x^{(i)}$

For  $k = 1$  to  $K_{opt}$

$\mu_k$  – рассчитывать, как усредненную сумму по координатам векторов узлов входящих в кластер  $k$ .

}

*Процесс кластеризации* заканчивается, когда все координаты центров кластеров  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$  не изменяются по сравнению с их предыдущими координатами.

Затем определяется значение «стоимости кластеризации», как сумма квадратов расстояний между узлом и ближайшими центрами кластеров по формуле (3).

$$J(c^{(1)}, \dots, c^{(m)}, \mu_1, \dots, \mu_k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|x^{(i)} - \mu_{c^{(i)}}\|^2. \quad (3)$$

- Этап 4. Выполняется алгоритм нахождения ближайшего узла к центру кластера и назначения его в качестве ГКУ с использованием евклидова расстояния:

$$p(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2}, x, y \in R^n. \quad (4)$$

*Протокол маршрутизации данных в гетерогенной БСС* включает два компонента: *первый* – протокол маршрутизации данных в наземной БСС с использованием *КМННСП*, *второй* – генетический алгоритм для поиска кратчайшего пути между беспилотниками в летающей сети.

Для маршрутизации данных в НБСС предложено использовать однослойную рекуррентную нейронную сеть Хопфилда (НСХ). В третьей главе приведено математическое описание маршрутизации данных с использованием НСХ и псевдокод алгоритма.

Для наземной беспроводной сенсорной сети разработан протокол кратчайшего пути *КмННСП* (*K-means and Hopfield Neural Network for Shortest Path*) между всеми узлами ГКУ для передачи данных на наземный шлюз. Данный протокол основан на интеграции модифицированного алгоритма К-средних для кластеризации НБСС и

определения узлов ГКУ и алгоритма нейронной сети Хопфилда для поиска пути передачи данных между узлами ГКУ к наземному шлюзу.

На рисунке 2 показан принцип работы двухэтапного протокола ***KmHNNSP***.



Рисунок 2 – Диаграмма этапов работы алгоритма маршрутизации ***KmHNNSP*** в течение одного раунда передачи данных

*Этап формирования кластера* – включает в себя выбор оптимального количества кластеров по формулам (1), (2) и формирование кластеров с помощью модифицированного алгоритма К-средних.

*Этап передачи данных* – включает в себя:

– выбор узлов ГКУ внутри сформированных кластеров: в каждом раунде передачи/приема данных периодически последовательно выбирается узел ГКУ в каждом кластере в соответствии со следующей формулой:

$$y_{gku} = r \bmod n. \quad (5)$$

где:  $n$  – количество узлов в кластере;  $r$  – номер раунда;  $y_{gku}$  – узел, который будет выбран в качестве ГКУ,

– внутрикластерная передача данных путем отправки данных на узлы ГКУ,

– межкластерная передача данных путем выбора кратчайшего пути, проходящего через все узлы ГКУ с использованием нейронной сети Хопфилда, и передачу данных с узлов ГКУ на наземный шлюз.

Во втором компоненте протокола маршрутизации данных в гетерогенной БСС для нахождения кратчайшего пути между дронами в рое БПЛА используется два алгоритма. Один из них – *алгоритм метода Дейкстры*, позволяющий на основе данных о местоположении БПЛА входящих в рой провести поиск кратчайшего пути без учета данных матрицы радиовидимости.

Для расчета маршрутизации с учетом данных о радиусе радиовидимости дронов предлагается использовать метод интеллектуального анализа данных – генетический метод, который изложен в третьей главе. При работе с *генетическом алгоритмом* необходимо учитывать 3 матрицы.

1 – *Матрица связи*  $C$  размерности  $(N*N)$ , где  $N$  – количество БПЛА, и может быть представлена в виде  $C = [C_{ij}]$ , где значения в ячейках главной диагонали равны нулю, а в остальных ячейках равны 0 или 1 в соответствии со следующими условиями:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{Существует связь между узлом } i \text{ и узлом } j \\ 0; & \text{Нет связи между узлом } i \text{ и узлом } j \end{cases}. \quad (6)$$

2 – Матрица расстояний  $D$  размерности  $(N*N)$ , которая рассчитывается с использованием Евклидова расстояния между каждым двумя узлами. Матрица расстояний представлена в виде  $D = [d_{ij}]$ , где  $d_{ij}$  – расстояние между узлами  $i, j$ ; при этом значения в ячейках по главной диагонали равны нулю.

3 – Матрица стоимости  $F$ , которая является поэлементным произведением матрицы связи на матрицу расстояний. Для значений матрицы стоимости, где нет связи между любыми двумя узлами, следует применять штраф. Матрица стоимости представлена следующим образом:

$$F = D .* C = \begin{cases} D_{ij} * C_{ij}; & \forall (i, j) \text{ узлы: } C_{ij} \neq 0 \\ D_{ij} + \text{штраф}; & \forall (i, j) \text{ узлы: } C_{ij} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где штраф = 100 применяется к любым двум БПЛА, которые не имеют связи или связаны «сами с собой», так как функция пригодности учитывает наименьшую стоимость. Матрица стоимости будет использоваться в функции пригодности.

Для решения задачи маршрутизации в рое БПЛА с помощью генетических алгоритмов (ГА) используется несколько концепций, включающих хромосому, генетические факторы, такие как скрещивание/ кроссинговер и мутация, а также функцию пригодности. Эти понятия позволяют выбрать оптимальный путь данных, закодированный хромосомой, после выполнения генетических операций. Функция пригодности используется для оценки качества решения для каждой особи.

Потенциальное решение/хромосому можно представить массивом целых чисел, где каждый ген соответствует БПЛА, а длина массива равна числу узлов в этой схеме. На рисунке 3 показана схема маршрутизации в рое БПЛА. Значения генов в позициях от 0 до 9 представляют БПЛА, формирующие путь от БПЛА, ближайшего к наземному шлюзу в позиции 0 (БПЛА2), до БПЛА, ближайшего к базовой станции в позиции 9 (БПЛА4).



Рисунок 3 – Пример формирования маршрута в хромосоме

Каждая хромосома представляет правильный путь. Таким образом, маршрутизация генерируется на основе позиций узлов в сети. С помощью этой

информации можно создавать маршруты случайным образом для исходной популяции, путём выбора нескольких возможных путей между источником и базовой станцией.

Основополагающим аспектом генетических алгоритмов для генерации потенциальных решений является отбор родительских особей для создания новых особей или новых потенциальных путей. В данной работе используется турнирный метод отбора родительских особей.

Первоначальный генетический процесс, используемый для улучшения качества решения (потенциального пути) после отбора лучших родителей, включает в себя скрещивание. В качестве фактора скрещивания выбран одноточечный скрещивание, при котором в каждом родителе выбирается случайная точка скрещивания для обмена генами. При этом выделенные фрагменты генов, которыми обмениваются родители, изолируются, а дублирующийся гены удаляются.

Для поддержания генетического разнообразия в популяции и избегания попадания в локальный оптимум используется второй генетический фактор – мутация. Этот процесс изменяет значение гена в выбранной позиции в процессе скрещивания на случайное число от 1 до  $N-1$ .

Необходимой функцией генетического алгоритма является определение функции пригодности  $G$  для каждой сформированной особи (возможного пути) для оценки её качества. В этом случае имеет смысл определить функцию пригодности на основе заданных критериев. В качестве критериев в работе приняты радиус радиовидимости каждого БПЛА и попарные расстояния между узлами БПЛА.

$$G(m) = \sum F_{i,j}; \text{ где } (i,j) \text{ узлы } \in \text{ маршрут } m, \quad (8)$$

где  $m$  – маршрут, содержащий узлы;  $G(m)$  – пригодность маршрута  $m$ ;  $F_{i,j}$  – стоимость связи ячеек для  $i, j$  узлов.

В третьей главе, на основе передатчика и приемника сенсорных узлов также представлена модель энергопотребления узлов при передаче данных. Такая модель позволяет рассчитать время жизни узлов и, следовательно, время жизни сенсорной сети в целом.

**В четвертой главе** приведены результаты компьютерных экспериментов, полученные с помощью программного комплекса для моделирования гетерогенной БСС (ПК МГБСС), структура которого приведена на рисунке 4, использующего язык Python в среде Anaconda с библиотеками Pandas, NumPy, Sklearn, Matplotlib, Ipywidgets.

На рисунке 4 показано, что ядром программного комплекса является сервер приложений, в рамках которого функционируют приложения, на основе алгоритмов интеллектуального анализа данных, приложения, с моделями структуры, методы комплексирования и статистические методы, обеспечивающие структурное

моделирование и обработку данных. Удаленный пользователь через приложение на WEB-сервере задает набор начальных условий для эксперимента, запускает моделирование, а условия обрабатываются на сервере приложения. Имеется возможность *запуска двух вариантов компьютерного эксперимента:*

- 1) с использованием протокола *KmHNNSP* и генетического алгоритма,
- 2) с использованием алгоритмов *K-средних* и *Дейкстры*.

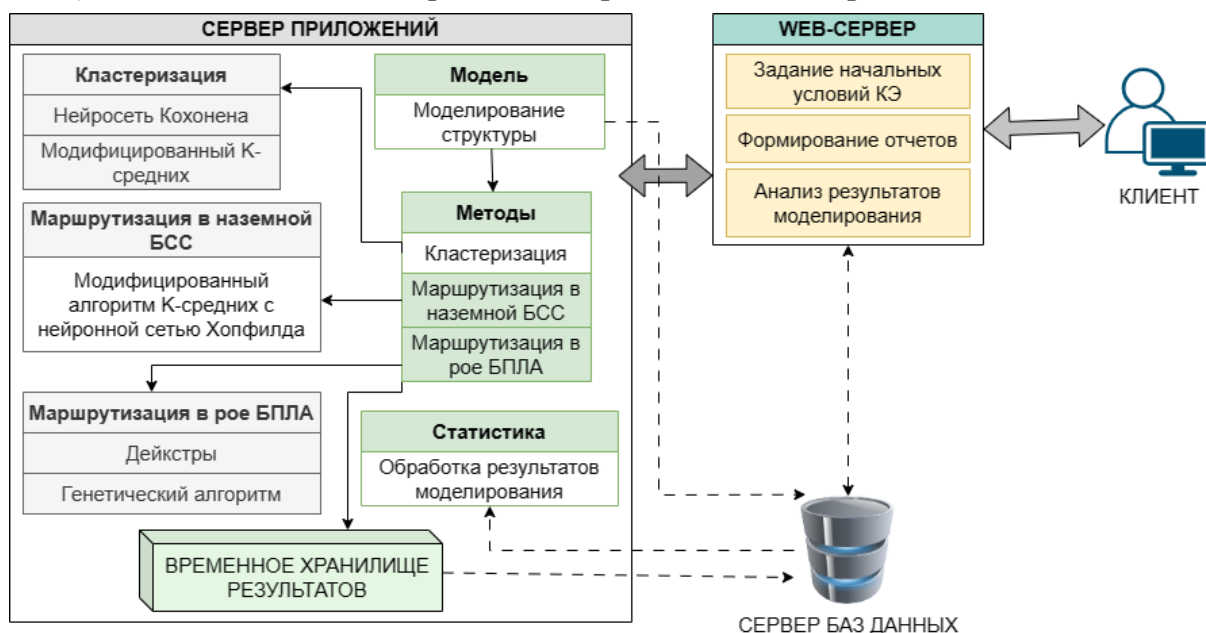


Рисунок 4 – Структура программного комплекса для моделирования гетерогенной БСС

Проведены исследования применения *модифицированного алгоритма K-средних* для реализации кластеризации в наземном сегменте БСС. В таблице 1 приведены результаты четырех экспериментов с различным количеством узлов (100, 250, 500, 1000) в модельном квадрате на плоскости, с изменяющимся размером площади.

Таблица 1 – Результаты экспериментов модифицированного алгоритма K-средних

№	Количество узлов (N)	Длина квадратного наземного поля, м	Время работы ПК (t), сек	Количество кластеров (K)
1	100	100	0,03	<b>10</b>
2	250	160	0,06	<b>15</b>
3	500	220	0,09	<b>22</b>
4	1000	320	0,28	<b>31</b>

В *первом варианте* моделирования в рамках ПК МГБСС, для реализации маршрутизации данных к наземному шлюзу, используется протокол *KmHNNSP*, для поиска кратчайшего пути между *всеми* ГКУ в НБСС. Механизм маршрутизации реализуется относительно местоположения датчиков и наземного шлюза,



описываемого координатами  $x$ ,  $y$  и  $z$  в двумерном пространстве, первоначально принимая  $z = 0$ .

Проведены четыре эксперимента с различным количеством узлов в модельном квадрате на плоскости с разными размерами наземного поля: 1) 100 узлов с размером  $100*100$  м<sup>2</sup>, 2) 250 узлов с размером  $160*160$  м<sup>2</sup>, 3) 500 узлов с размером  $220*220$  м<sup>2</sup>, 4) 1000 узлов с размером  $320*320$  м<sup>2</sup>. Наземный шлюз также размещен в фиксированном месте для всех экспериментов с координатами ( $x = 200$ ,  $y = 200$ ).

В таблице 2 приведены результаты экспериментов протокола **KmHNNSP** в НБСС, где каждая цифра в пути передачи данных представляет собой порядковый номер узла ГКУ.

Таблица 2 – Результаты экспериментов протокола KmHNNSP в НБСС

№ экс.	Время работы ПК (t), сек	Путь передачи данных между всеми ГКУ
1	0,43	99 -> 91 -> 92 -> 88 -> 87 -> 94 -> 95 -> 81 -> 93 -> 97 -> 100
2	1,04	245 -> 230 -> 151 -> 241 -> 243 -> 249 -> 209 -> 247 -> 228 -> 224 -> 157 -> 199 -> 248 -> 238 -> 246 -> 250
3	4,64	496 -> 488 -> 477 -> 494 -> 495 -> 468 -> 500 -> 442 -> 493 -> 492 -> 481 -> 487 -> 418 -> 499 -> 486 -> 490 -> 7 -> 478 -> 461 -> 497 -> 409 -> 264 -> 500
4	14,54	994 -> 959 -> 957 -> 974 -> 997 -> 998 -> 979 -> 941 -> 995 -> 984 -> 991 -> 967 -> 988 -> 987 -> 999 -> 965 -> 915 -> 953 -> 993 -> 908 -> 970 -> 934 -> 990 -> 981 -> 989 -> 996 -> 898 -> 919 -> 963 -> 939 -> 935 -> 1000

В результате завершения маршрутизации в сегменте НБСС пакет с агрегированными данными инкапсулируется в наземном шлюзе, после чего происходит отправка полученных данных с наземного шлюза на ближайший БПЛА в рое в пакете «ДАННЫЕ» в последовательные моменты времени как показано на рисунке 5. Первое поле представляет собой порядковый номер пакета, второе – адрес отправителя, третье – адрес получателя, четвертое - тип отправляемого пакета, пятое – тип отправляемых команд, но в примере командный пакет отсутствует, следовательно, данное поле не учитывается, и шестое - собственно отправляемые данные.

– В момент времени  $t_0$

1	2	3	4	5	6
11	наземный шлюз (100)	БПЛА (UAV3)	1	–	Агрегированные данные

– В момент времени  $t_1$

1	2	3	4	5	6
11	наземный шлюз (100)	БПЛА (UAV0)	1	–	Агрегированные данные

Рисунок 5 – Структура пакета данных, передаваемого с наземного шлюза на ближайший БПЛА в два момента времени  $t_0$ ,  $t_1$

Поскольку расчет маршрута в рое БПЛА, а, следовательно, и ближайшего беспилотника к шлюзу с помощью генетического алгоритма происходит очень быстро, за сотые доли секунды, то процесс маршрутизации в рое между шлюзом и базовой станцией запускается сразу, после инкапсулирования пакета с агрегированными данными в наземном шлюзе.

Ниже приведены результаты экспериментов по маршрутизации данных в рое из 10 БПЛА, случайным образом распределенных в трехмерном пространстве в коридоре  $20 \times 6$  в пределах слоя  $[0,5-0,6]$  км в два последовательных момента времени  $t_0$ ,  $t_1$ , во время которых БПЛА изменили свои местоположения. Генетический алгоритм работает в течение 1000 поколений, а используемая начальная популяция состоит из 10 хромосом. Поскольку рабочая среда является динамичной и изменяющейся, формирование хромосом вручную нецелесообразно. Автором разработана программа, формирующая хромосомы автоматически. На рисунке 6 приведены последовательности генов в каждой из 10 хромосом, а также рассчитаны функция пригодности для каждой хромосомы в начальных популяциях в момент времени  $t_0$  и  $t_1$ .

=====	=====
Начальная популяция:	Начальная популяция:
=====	=====
[3, 8, 2, 0, 6, 1, 7, 9, 4, 5] 702.61	[0, 5, 2, 3, 1, 4, 6, 8, 7, 9] 801.98
[3, 8, 1, 9, 7, 4, 2, 6, 0, 5] 605.41	[0, 3, 7, 1, 4, 8, 6, 5, 2, 9] 900.0
[3, 1, 9, 4, 2, 8, 0, 6, 7, 5] 703.54	[0, 4, 6, 8, 3, 5, 7, 1, 2, 9] 900.0
[3, 4, 0, 9, 8, 6, 7, 2, 1, 5] 900.0	[0, 5, 6, 1, 3, 7, 8, 2, 4, 9] 900.0
[3, 0, 9, 6, 4, 1, 2, 8, 7, 5] 801.35	[0, 4, 5, 8, 2, 3, 1, 7, 6, 9] 703.56
[3, 7, 6, 2, 9, 0, 8, 1, 4, 5] 801.87	[0, 6, 4, 7, 5, 8, 2, 1, 3, 9] 900.0
[3, 6, 1, 7, 9, 0, 8, 2, 4, 5] 801.92	[0, 4, 5, 7, 1, 6, 2, 3, 8, 9] 605.17
[3, 2, 6, 7, 1, 9, 0, 8, 4, 5] 801.87	[0, 8, 5, 2, 1, 6, 3, 7, 4, 9] 900.0
[3, 2, 4, 6, 0, 1, 7, 8, 9, 5] 506.45	[0, 7, 3, 6, 2, 1, 4, 5, 8, 9] 703.19
[3, 8, 4, 2, 6, 0, 1, 7, 9, 5] 506.96	[0, 1, 7, 8, 5, 6, 4, 2, 3, 9] 703.96

а)

б)

Рисунок 6 – Формирование начальной популяции из 10 хромосом

а) начальная популяция при  $t_0$ , б) начальная популяция при  $t_1$

В результате в момент времени  $t_0$  получена лучшая хромосома/кратчайший путь  $\{3,4,6,2,9,5\}$ , которая состоит из последовательности индексов БПЛА, составляющих путь, т.е. 3 – индекс БПЛА, который равен UAV3 и 4 – индекс БПЛА, который равен UAV4 и т.д. UAV3 – это ближайший БПЛА к наземному шлюзу, а UAV5 – ближайший БПЛА к базовой станции. Также, в момент времени  $t_1$  получена лучшая хромосома/кратчайший путь  $\{0,2,3,4,9\}$  как показано на рисунке 7.

Маршрут интегрированного пакета с данными, полученными от наземной сети, начинается от шлюза (0, 0, 0), который передает данные в ближайший БПЛА (UAV3 в момент времени  $t_0$  и UAV0 в момент  $t_1$ ) и последовательно до узла (UAV5 в момент времени  $t_0$  и UAV9 в момент времени  $t_1$ ), который передает данные на базовую станцию (20, 06, 0). Необходимое время нахождения пути данных составляет 0,013 секунды в момент времени  $t_0$  и 0,018 секунды в момент времени  $t_1$ , как показано на рисунке 8.

```

=====
Решение: [3, 4, 6, 2, 9, 5]
=====
Пригодность: 204.78694261244175
Время нахождения пути данных: 0.0129
Маршрут:
UAV3 -> UAV4 -> UAV6 -> UAV2 -> UAV9 -> UAV5
    
```

а)

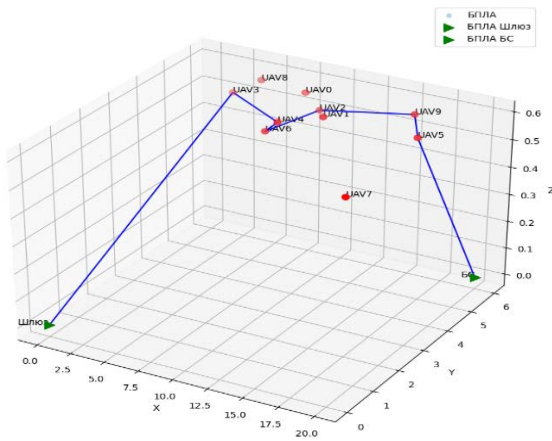
```

=====
Решение: [0, 2, 3, 4, 9]
=====
Пригодность: 301.9864413584731
Время нахождения пути данных: 0.018
Маршрут:
UAV0 -> UAV2 -> UAV3 -> UAV4 -> UAV9
    
```

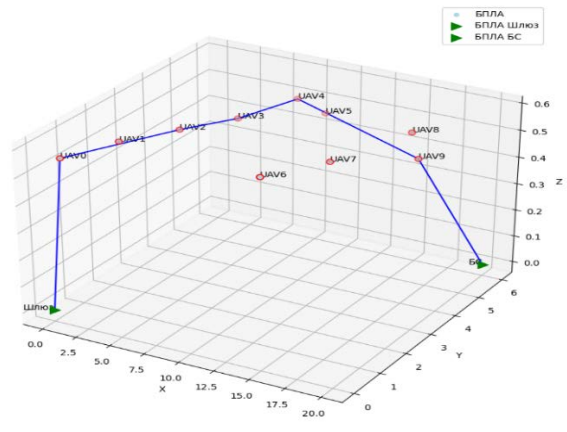
б)

Рисунок 7 – Результаты генетического алгоритма и получение кратчайшего пути:

а) кратчайший маршрут при  $t_0$ , б) кратчайший маршрут при  $t_1$



а)



б)

Рисунок 8 – Визуализация результатов маршрутизации в 3D-пространстве:

а) маршрут при  $t_0$ , б) маршрут при  $t_1$

Завершающим этапом является передача данных, полученных ближайшим к БС БПЛА, на базовую станцию в пакете «ДАННЫЕ» в два момента времени как показано на рисунке 9.

12	БПЛА (UAV5)	БС	1	–	Агрегированные данные
----	-------------	----	---	---	-----------------------

– В момент времени  $t_1$

12	БПЛА (UAV9)	БС	1	–	Агрегированные данные
----	-------------	----	---	---	-----------------------

Рисунок 9 – Структура пакета данных, передаваемого с БПЛА на базовую станцию в два момента времени  $t_0, t_1$

На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможности применения генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации в меняющейся динамической среде.

В итоге для различного количества наземных сенсорных узлов (100, 250, 500, 1000) в типовом квадрате с разными размерами наземного поля (100\*100 м<sup>2</sup>, 160\*160 м<sup>2</sup>, 220\*220 м<sup>2</sup>, 320\*320 м<sup>2</sup>) суммарное время, затрачиваемое на поиск пути от наземных узлов ГКУ до базовой станции, составляет последовательность:

- в момент времени  $t_0$ , (0.458, 1.068, 4.668, 14.568) секунд,
- в момент времени  $t_1$ , (0.4639, 1.0739, 4.6739, 14.5739) секунд.
- в момент времени  $t_0$ .

Таким образом, время формирования пути через *все* ГКУ для НБСС существенно превышает время формирования маршрута в рое, которое составляет сотые доли секунды.

*Вторым вариантом* работы программного комплекса МГБСС является реализация модели маршрутизации данных от наземного шлюза к базовой в рое из 250 БПЛА с координатами в трёхмерном пространстве. Для этого реализован механизм кластеризации и маршрутизации данных с использованием методов интеллектуального анализа, комплексированием модифицированного алгоритма К-средних и алгоритма Дейкстры.

Проведено исследование эффективности протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*. Для оценки эффективности двух протоколов в качестве показателей использовались время жизни сети, количество головных кластерных узлов (ГКУ), потребляемая энергия и количество пакетов к ГКУ. Протоколы ILEACH и LEACH смоделированы в среде MathWorksMATLABR2019b. Параметры инициализации протоколов приведены в табл.3. Для нейронной сети Хопфилда использовались следующие параметры  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$ ,  $\mu_4$  и  $\mu_5$ . Значение  $\mu_1$  минимизирует общую стоимость,  $\mu_2$  предотвращает включение в выбранный путь несуществующих звеньев,  $\mu_4$  предотвращает сходимость к нестабильному состоянию,  $\mu_5$  вводится для обеспечения того, чтобы исходный и конечный узлы принадлежали решению, а  $\mu_3$  – параметр, используемый для обеспечения сходимости; параметр  $\lambda$  определяет время вычисления нейронной сети Хопфилда до сходимости и корректность алгоритма; А, В и С – константы, регулирующие вес предыдущих входов нейронной сети Хопфилда.

Протокол *KmHNNSP* реализован для нескольких раундов передачи данных в двух случаях:

1. Первый случай: базовая станция находится вне области БСС.
2. Второй случай: базовая станция находится в центре области БСС.

В результате моделирования протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*, получены следующие графики для соотношения количества узлов к раунду, как показано на рисунке 10.

При нахождении базовой станции вне области беспроводной сенсорной сети значение времени жизни сети при использовании разработанного протокола с учетом условий, указанных в таблице 3 выше, составляет 3950 раундов, а при использовании протокола LEACH – 1893 раунда и протокола ILEACH – 2158 раунда. В случае, когда базовая станция находится в центре области БСС, значение времени жизни сети при использовании разработанного протокола составляет 9050 раундов, а при использовании протокола LEACH – 4973 раунда и протокола ILEACH – 8510 раундов.

На рисунке 10 показано, что время жизни сети меньше во всех протоколах, когда базовая станция расположена вне сенсорного поля, а не внутри. Это подтверждает, что время жизни сети зависит от расположения базовой станции и расстояния между узлами и базовой станцией. Стоит отметить, что время жизни сети в разработанном протоколе значительно больше, чем в других, особенно когда базовая станция расположена за пределами сенсорного поля. Этот вывод согласуется с предложенной моделью сети.

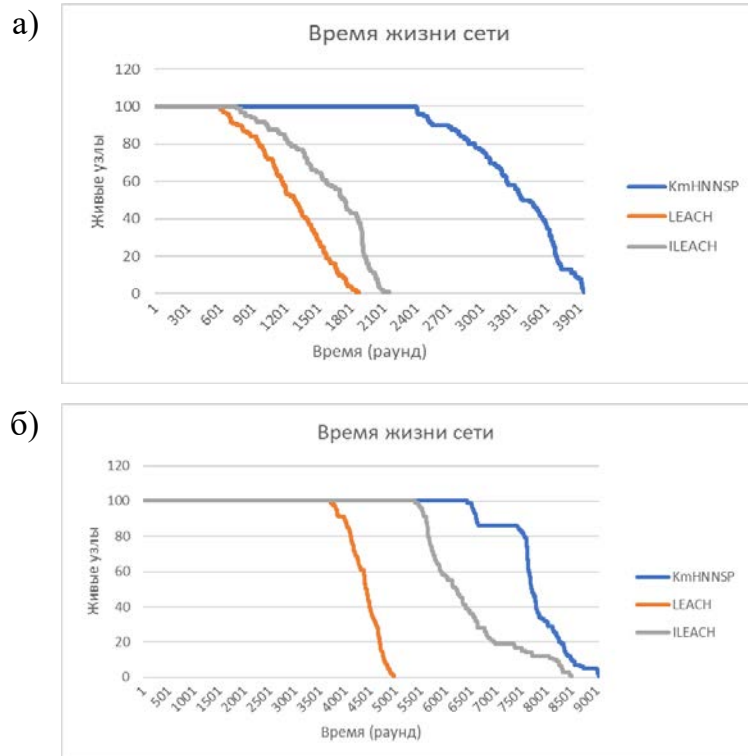


Рисунок 10 – Времени жизни сети для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*:

а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

Таблица 3 – Параметры инициализации протоколов

Параметр	Значение
Размеры наземного сенсорного поля	100 * 100 м <sup>2</sup>
координаты базовой станции (БС)	(200, 200); (50, 50) м
количество беспроводных узлов	100
Радиус радиовидимости датчика	100 м
Начальная энергия датчиков ( $E_0$ )	2 Дж/бит
Энергия передачи ( $E_{TX}$ )	50 нДж/бит
Энергия приёма ( $E_{RX}$ )	50 нДж/бит
Энергия агрегации данных ( $E_{DA}$ )	5 нДж/бит
Энергия усиления в случае многолучевого демпфирования ( $\epsilon_{mp}$ )	0.0013 пикоДж/бит
Энергия усиления в случае свободного пространства ( $\epsilon_{fs}$ )	10 пикоДж/бит
размер пакета данных	4000 байт
размер пакета команд	100 байт

Таким образом, в случае нахождения БС вне области БСС время жизни сети в протоколе *KmHNNSP* больше, чем в *LEACH* и *ILEACH*, так как количество отправленных пакетов на базовую станцию в первом протоколе меньше, чем во втором и третьем, и это связано с механизмом передачи пакетов на базовую станцию только через головные узлы, а не напрямую от ГКУ к базовой станции. Кроме того, период стабильности (время до гибели первого узла) в разработанном протоколе длиннее, чем в *LEACH* и *ILEACH*, и это связано с формированием кластеров и выбором ГКУ. Таким образом, разработанный протокол *KmHNNSP* балансирует энергопотребление между узлами и снижает энергопотребление за счет уменьшения количества пакетов, отправляемых на базовую станцию, и лучше согласуется с предложенной моделью гетерогенной БСС.

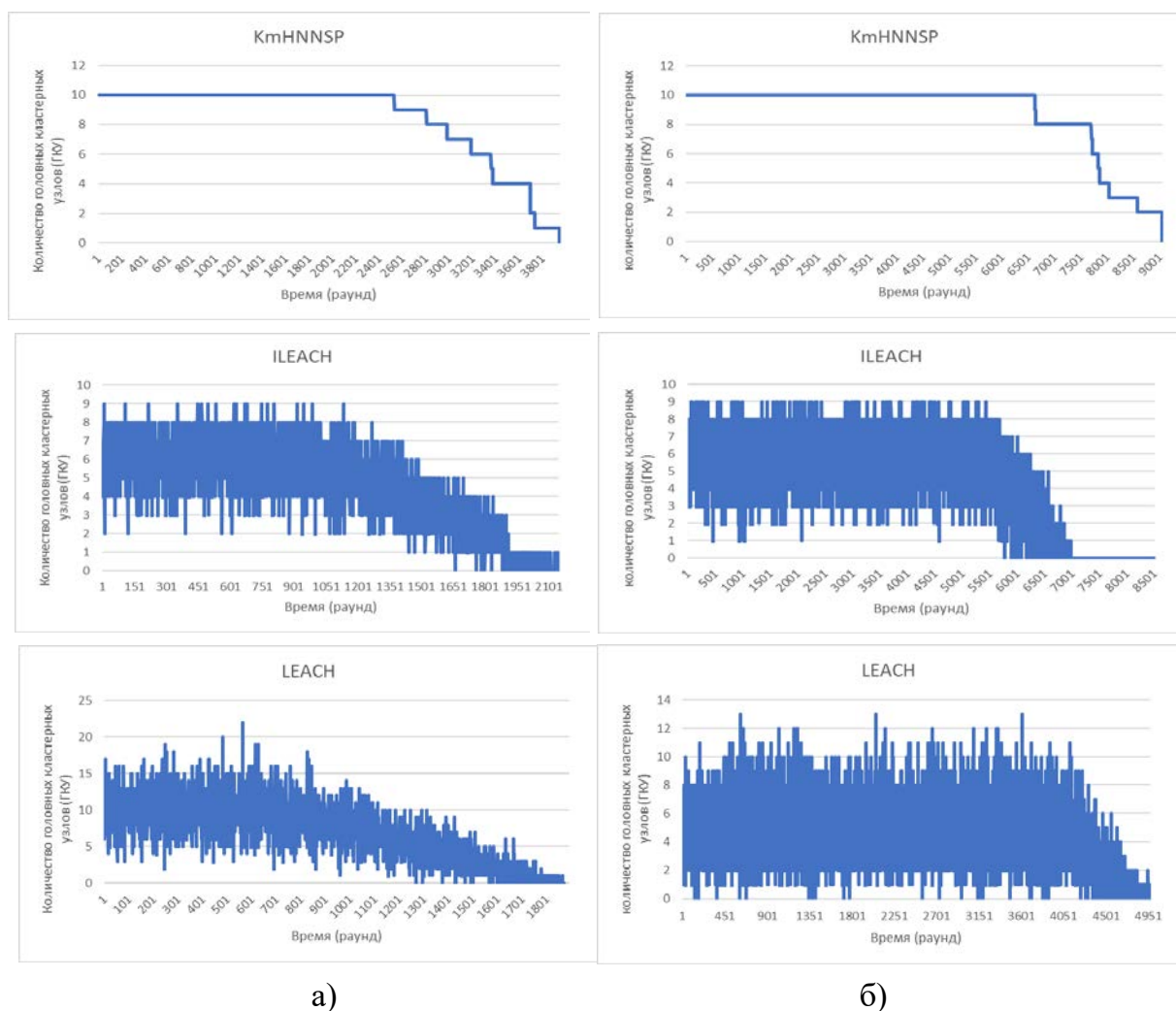


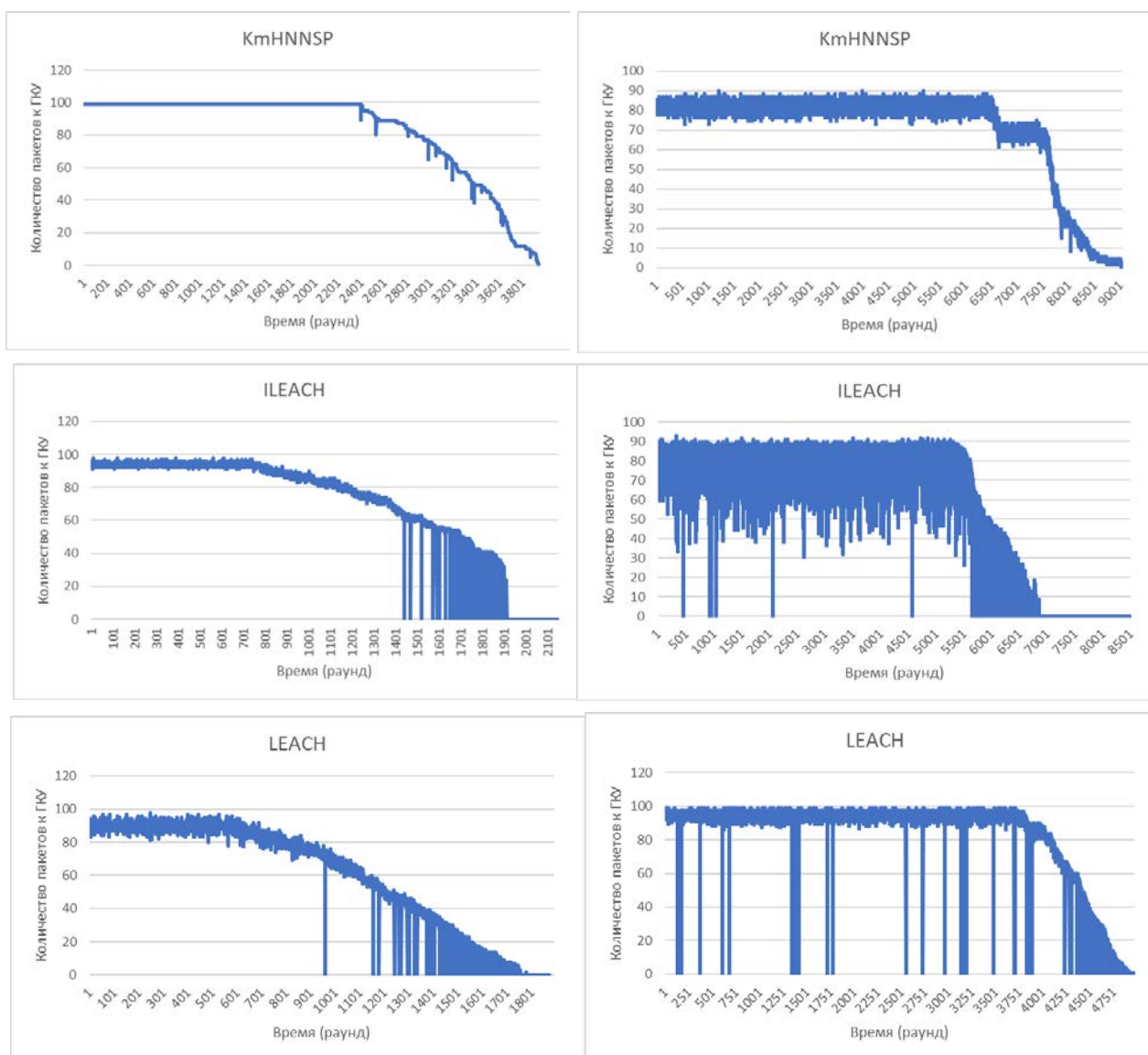
Рисунок 11 – Количество ГКУ для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*:  
 а) БС находится вне области БСС б) БС находится в центре области БСС

На рисунке 11 показано количество головных кластерных узлов (ГКУ), полученных в двух случаях с использованием протокола *KmHNNSP* и протокола *LEACH*. Как видно из рисунке 11, количество ГКУ-узлов в протоколе *KmHNNSP*



фиксировано, что снижает нагрузку на базовую станцию при прохождении пакетов данных. В то время как в протоколах LEACH и ILEACH количество ГКУ-узлов изменяется в зависимости от каждого раунда, может быть получено большое количество ГКУ-узлов, что увеличивает нагрузку на базовую станцию. Во всех протоколах количество ГКУ-узлов уменьшается с течением времени (раундов) в результате уменьшения количества работающих (живых) узлов.

На рисунке 12 показано количество пакетов данных, отправленных от сенсорных узлов к ГКУ в каждом раунде. Отмечается, что в протоколах LEACH и ILEACH существуют раунды, в которых данные могут не передаваться. В то время как в протоколе *KmHNNSP* количество пакетов данных фиксированное, регулярное и прямо пропорционально количеству полученных ГКУ.

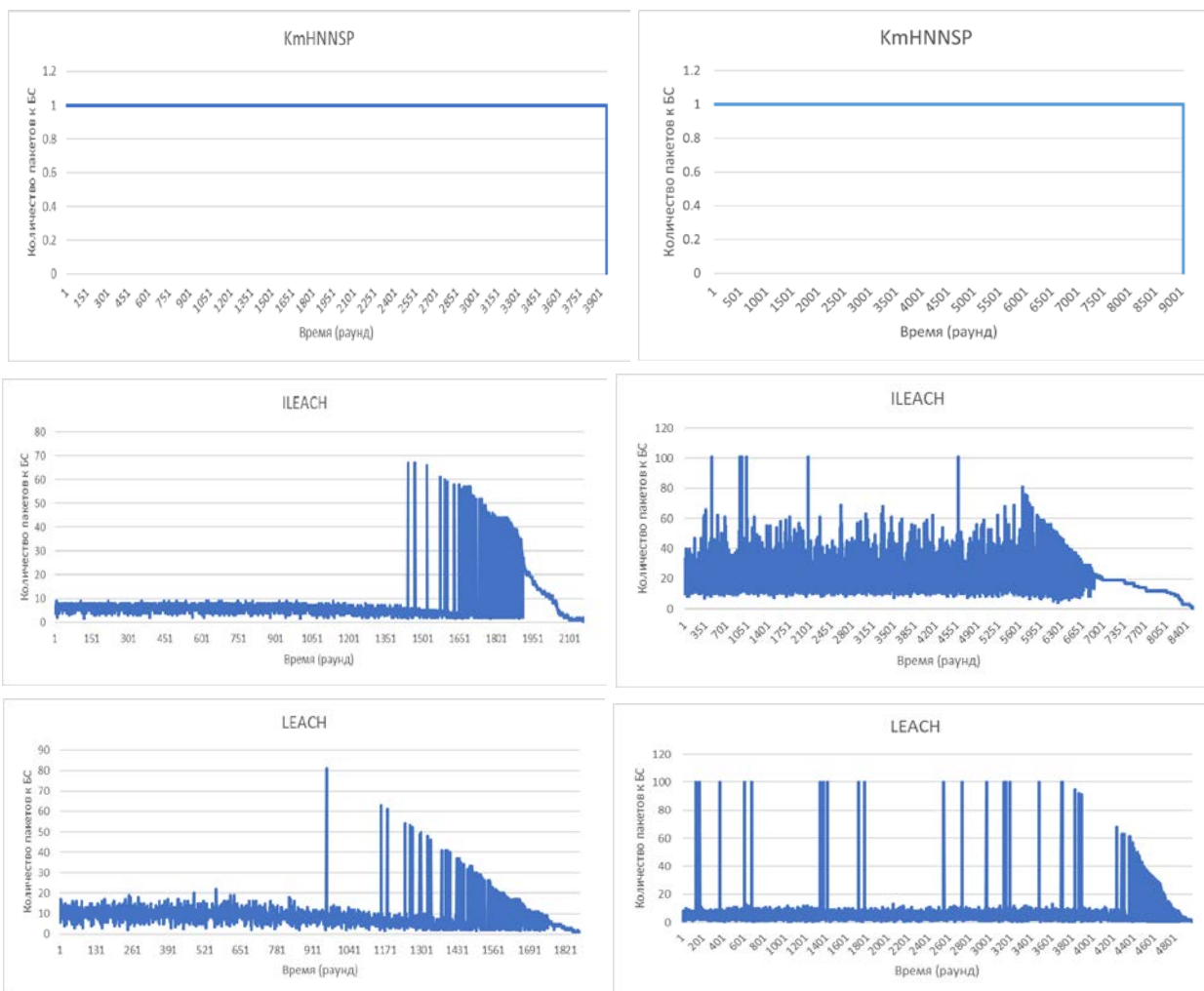


а)

б)

Рисунок 12 – Количество пакетов к ГКУ для протоколов *KmHNNSP*, ILEACH и LEACH:

а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

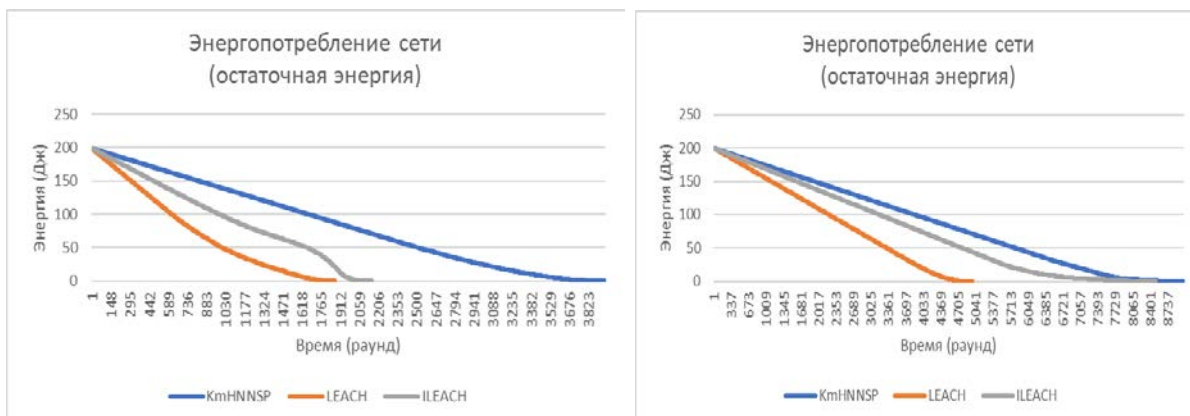


а)

б)

Рисунок 13 – Количество пакетов к БС для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*: а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

На рисунке 13 показано количество пакетов, отправленных на базовую станцию для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH* в обоих случаях. Количество пакетов, отправленных на базовую станцию, уменьшается по мере гибели узлов сети.



а)

б)

Рисунок 14 – Результаты энергопотребления для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*: а) БС находится вне области БСС б) БС находится в центре области БСС



На рисунке 14 также показан график энергопотребления в каждом раунде при использовании протоколов *KmHNNSP*, LEACH и ILEACH. Меньшее потребление энергии наблюдается в протоколе *KmHNNSP* по сравнению с протоколами ILEACH и LEACH.

На рисунке 15 показана пропускная способность сети для протоколов *KmHNNSP*, ILEACH и LEACH в обоих случаях. Видно, что пропускная способность сети выше при использовании протокола *KmHNNSP* по сравнению с другими.

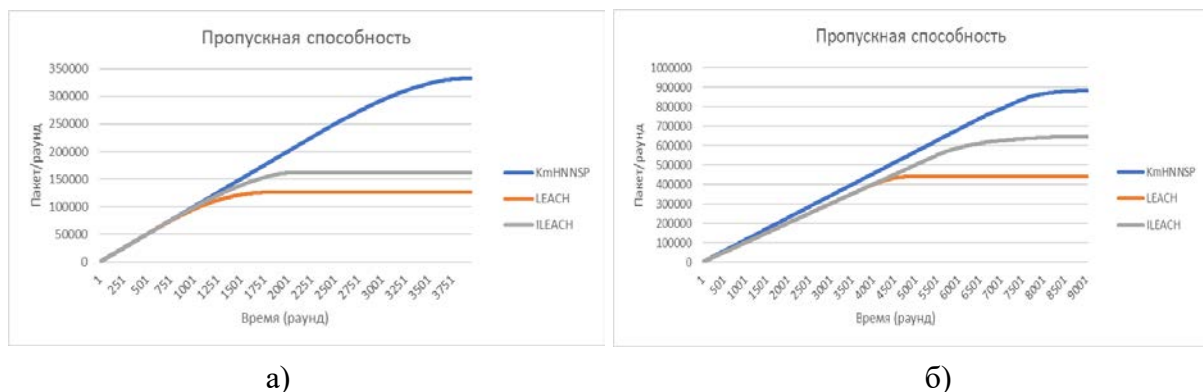


Рисунок 15 – Пропускная способность сети для протоколов *KmHNNSP*, ILEACH и LEACH:  
а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

Таким образом, можно сделать заключение о том, что протокол *KmHNNSP* работает лучше, чем протоколы LEACH и ILEACH, и видно, что протокол *KmHNNSP* очень эффективен для передачи данных на большие расстояния, что согласуется с предложенной моделью работы.

**В заключении** изложены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа связана с исследованием и применением методов интеллектуального анализа данных для повышения показателей качества и эффективности сбора и передачи данных в гетерогенной БСС, объединяющей наземную сеть со стационарными сенсорными узлами и летающую сенсорную сеть, применение которой предполагается при мониторинге и контроле зон покрытия с использованием интернета вещей в труднодоступных районах горной местности в Сирии.

В этой связи, после широкого исследования научных и практических работ, связанных с тематикой QoS БСС разработан формализм математической модели

гетерогенной БСС, обеспечивающий эффективную обработку и передачу трафика в разных сегментах исследуемой сети. Модель разработана с применением разных методов интеллектуального анализа данных для двух частей сети: наземной беспроводной сенсорной сети со стационарными узлами и летающей сенсорной сети. Данный подход позволяет использовать технологии интернета вещей в труднодоступной горной местности и передавать данные с датчиков на удаленную базовую станцию для обработки.

Для комплексной модели БСС разработан метод эффективной кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием модифицированного алгоритма K-средних, с учетом зон радиовидимости и GPS-координат узлов, который обеспечивает поиск и формирование оптимального количества кластеров и исключает аварийные остановы.

Предложена методика маршрутизации данных для наземного сегмента БСС с использованием нейронной сети Хопфилда, с учетом энергоэффективности сенсорных узлов позволяет найти кратчайший путь, проходящий через все ГКУ к наземному шлюзу, снижая энергопотребление сенсорных узлов и увеличивая время жизни сети по сравнению с другими протоколами в зависимости от расположения шлюза: в случае БС вне сенсорного поля время жизни сети увеличивается на 52% по сравнению с протоколом LEACH и на 45% по сравнению с протоколом ILEACH; в случае БС внутри сенсорного поля на 45% по сравнению с протоколом LEACH и на 6% по сравнению с протоколом ILEACH. На основе алгоритмов кластеризации и ИНС Хопфилда разработан протокол маршрутизации данных KmHNNSP (K-means and Hopfield Neural Network for Shortest Path) в наземной беспроводной сенсорной сети, снижающий энергопотребление при передаче/приеме данных.

Исследована и смоделирована маршрутизация данных в рое БПЛА с использованием генетического алгоритма. Показано, что генетический алгоритм позволяет учитывать динамическое изменение топологии сети и данные матрицы радиовидимости.

На основе структуры пакетов данных разработан обобщенный протокол, содержащий сценарии сбора и передачи данных для этапов кластеризации в наземной сети БСС и маршрутизации в наземном и летающем сегментах БСС гетерогенной сети.

Разработан программный комплекс с удаленным доступом для моделирования передачи данных в гетерогенной БСС и исследования эффективности применения алгоритмов интеллектуального анализа данных.

В рамках программного комплекса проведено имитационное моделирование сбора и передачи данных в гетерогенной БСС для разных сегментов сети, топологий и с разным количеством узлов, продемонстрирована работоспособность выработанных

решений на основе интеллектуальных методов и целесообразность их использования, подтверждаемая более высокими значениями показателей QoS для исследуемой модели сети.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Мохаммад, Н. Разработка имитационной модели использования роя беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Н. Мохаммад, Л.И. Воронова, В.И. Воронов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 55-61. – DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-3-55-61.

2. Навар, М. Моделирование маршрутизации в кластеризованном рое БПЛА с использованием генетического алгоритма / М. Навар, Л.И. Воронова, В.И. Воронов // Первая миля. – 2023. – № 6(114). – С. 46-53. – DOI 10.22184/2070-8963.2023.114.6.46.52.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных**

3. Mohammad, N. Modeling the Clustering of Wireless Sensor Networks Using the K-means Method / L. I. Voronova, V. I. Voronov, N. Mohammad // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T&QM&IS 2021, 06–10 – Yaroslavl, 2021. – P. 740-745. – DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642747.

4. Mohammad, N. "Development of a simulation model for using a swarm of UAVs in agriculture" / N. Mohammad, L.I. Voronova, V.I. Voronov // In International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology, and Agriculture (RSE 2022), vol. 12296, pp. 174-180. SPIE, 2022. DOI: 0.1117/12.2643249.

5. Mohammad N. "Software Complex for Modelling Routing in Heterogeneous Model of Wireless Sensor Network" / N.F. Mohammad, L.I. Voronova, V.I. Voronov, S.A. Rozhkov // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2024. P. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496736.

### **Другие статьи и материалы конференций**

6. Мохаммад Н. Беспроводные Сенсорные Сети Как Основа Интернета Вещей / Л.И. Воронова, Н. Мохаммад // Сборник материалов XI Молодёжного научного Форума МТУСИ. 2020 – С. 155-161.

7. Мохаммад Н. Моделирование кластеризации беспроводной сенсорной сети нейросетевым конструктивным методом / Л.И. Воронова, Н. Мохаммад // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 4-19.

8. Nawar Mohammad, "Development of wireless sensor networks efficient clusterization method," Synchroninfo Journal 2024, vol. 10, no. 1, pp. 32-38. DOI: 10.36724/2664-066X-2024-10-1-32-38.

### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

9. Мохаммад Н., Воронова Л.И., Воронов В.И., Ларин А.И. Программа для моделирования маршрутизации в кластеризованном рое БПЛА с использованием

генетического алгоритма. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618357, 2023.

10. Мохаммад Н., Воронова Л.И., Воронов В.И., Ларин А.И. Программа для моделирования динамической кластеризации роя БПЛА с использованием алгоритма К-средних.» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618048, 2023.

11. Мохаммад Н., Воронова Л.И., Воронов В.И., Смольников В.А. Программный комплекс для моделирования гетерогенной беспроводной сенсорной сети. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685567, 2023.