

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-07

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

**Л. Л. Семенова***Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6384-0996>, [semenova\\_ll@surgu.ru](mailto:semenova_ll@surgu.ru)*

*Аннотация:* проведен сравнительный анализ энергоэффективности протоколов LEACH и PEGASIS в контексте их применения в территориально распределенных беспроводных сенсорных сетях. Исследование направлено на выявление зависимости между выбором протокола и энергетической эффективностью сети, а также на определение влияния этих протоколов на продолжительность жизни сенсорных сетей. Результаты моделирования демонстрируют, что протокол PEGASIS превосходит LEACH по обоим параметрам, обеспечивая более длительную работу сети и улучшенную энергоэффективность. На основании полученных результатов может быть определен один из факторов оптимальных стратегий развертывания сенсорных сетей, учитывая их энергетические характеристики и требования к продолжительности функционирования.

*Ключевые слова:* беспроводные сенсорные сети, энергоэффективность, передача данных, иерархические протоколы, протокол LEACH, протокол PEGASIS.

*Для цитирования:* Семенова Л. Л. Сравнительный анализ энергоэффективности иерархических протоколов передачи данных в территориально распределенных беспроводных сенсорных сетях. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):54–60. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-07.

*Поступила в редакцию: 14.02.2024.**В окончательном варианте: 07.03.2024.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HIERARCHICAL DATA TRANSMISSION PROTOCOLS IN GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED WIRELESS SENSOR NETWORKS

**L. L. Semenova***Surgut State University, Surgut, Russian Federation**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6384-0996>, [semenova\\_ll@surgu.ru](mailto:semenova_ll@surgu.ru)*

*Abstract:* this study conducts a comparative analysis of the energy efficiency of LEACH and PEGASIS protocols within the context of their application in geographically distributed wireless sensor networks. The research aims to identify the relationship between protocol selection and network energy efficiency, as well as to determine the impact of these protocols on the lifespan of sensor networks. Simulation results demonstrate that the PEGASIS protocol surpasses LEACH in both parameters, providing longer network operation and improved energy efficiency. Based on the findings, one of the factors for optimal sensor network deployment strategies can be determined, considering their energy characteristics and operational longevity requirements.

*Keywords:* wireless sensor networks, energy efficiency, data transmission, hierarchical protocols, LEACH protocol, PEGASIS protocol.

*Cite this article:* Semenova L. L. Comparative Analysis of the Energy Efficiency of Hierarchical Data Transmission Protocols in Geographically Distributed Wireless Sensor Networks. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):54–60. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-07.

*Original article submitted: 14.02.2024.**Revision submitted: 07.03.2024.*

### **Введение**

В современном мире беспроводные сенсорные сети (БСС) занимают ключевое место в технологическом прогрессе, охватывая широкий спектр приложений от мониторинга окружающей среды до сельского хозяйства. Однако, несмотря на достигнутые успехи, существуют проблемы, требующие дальнейшего изучения, в частности, оптимизация энергопотребления и повышение долговечности сети.

Обычно БСС потенциально может включать в себя множество сенсорных узлов, число которых может исчисляться тысячами [1]. Каждый узел беспроводной сети оснащен измерительными датчиками, радиоприемниками, микроконтроллерами, элементами питания и другими необходимыми компонентами.

Процесс передачи информации между узлами БСС происходит посредством радиосвязи. Анализ протоколов передачи данных в рамках БСС подразумевает необходимость применения специализированных методических подходов, обусловленных имеющимися ограничениями и характеристиками этих систем. Особенности конструкции узлов БСС, а также стремление к увеличению продолжительности их работы налагают определенные требования к оптимизации соотношения между возможностями по передаче и энергоэффективностью. В настоящий момент исследования в области БСС в большей степени фокусируются на разработке алгоритмов и протоколов, которые обладают энергетической и вычислительной эффективностью, при этом их применение часто ограничивается основными задачами мониторинга и регистрации данных.

### Иерархические протоколы маршрутизации в БСС

Алгоритмы иерархической маршрутизации предполагают самоорганизацию узлов в кластеры, при этом для каждого кластера выбирается назначенный головной узел.

Анализ различных иерархических протоколов маршрутизации, применяемых в БСС, показывает, что основная идея заключается в том, что кластеризация сенсоров и выбор головных кластерных узлов (ГКУ) являются ключевыми стратегиями для оптимизации распределения энергетических ресурсов сети. Протоколы, такие как LEACH, PEGASIS, HEED, TEEN и APTEEN, демонстрируют различные подходы к кластеризации и выбору ГКУ, в частности, протоколы стремятся к балансировке энергетической нагрузки между узлами, использованию остаточной энергии узла как критерия для выбора ГКУ и минимизации энергопотребления за счет эффективной маршрутизации и агрегации данных [2–4].

Протокол LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) инициирует самоорганизацию узлов в кластеры, где узлы назначают себя в качестве ГКУ с определенной вероятностью [5]. Эти ГКУ затем агрегируют и перенаправляют данные от узлов своего кластера на базовую станцию (БС), периодически обновляя ГКУ для равномерного распределения энергетической нагрузки (рис. 1).

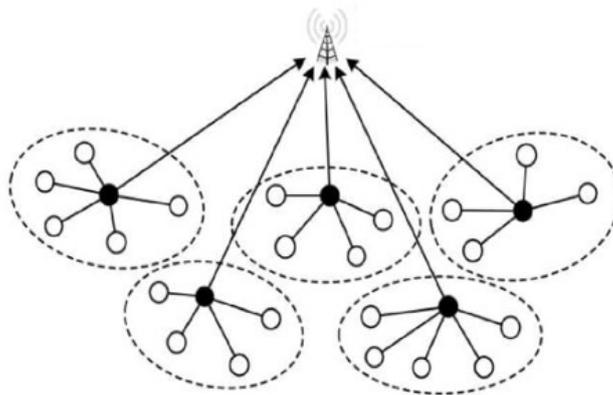


Рис. 1. Организация связи в протоколе LEACH

Каждому из  $n$  узлов присваивается случайное значение  $N$  от 0 до 1, рассчитывается значение порога  $T(n)$ :

$$T(n) = \frac{P}{1 - P(r \cdot \text{mod } P^{-1})}, \text{ при } \forall n \in G.$$

$$T(n) = 0, \text{ при } \forall n \notin G,$$

где  $r$  — порядок текущего ранга, — вероятность стать головным узлом,  $n$  — указатель на текущий узел,  $G$  — число узлов, которые не были главными в последних  $1/P$  раундах [4].

Узел назначается в качестве главного в кластере на текущий цикл, если его значение меньше заданного порогового значения  $T(n)$ . После того, как узел получает этот статус, он не может быть повторно выбран для этой роли, пока каждый узел в кластере не исполнит функции главы по крайней

мере один раз. Протокол LEACH предполагает, что каждый узел имеет одинаковую начальную энергию. Следует отметить, что протокол LEACH не обеспечивает оптимального выбора сенсорного узла в качестве ГКУ. Поскольку в алгоритме его работы (рис. 2) отсутствует какой-либо вывод относительно текущей энергии сенсорного узла, элемент кластера с неоптимальными энергетическими характеристиками, но не выбранный в течение длительного периода, может быть назначен в качестве головного узла.

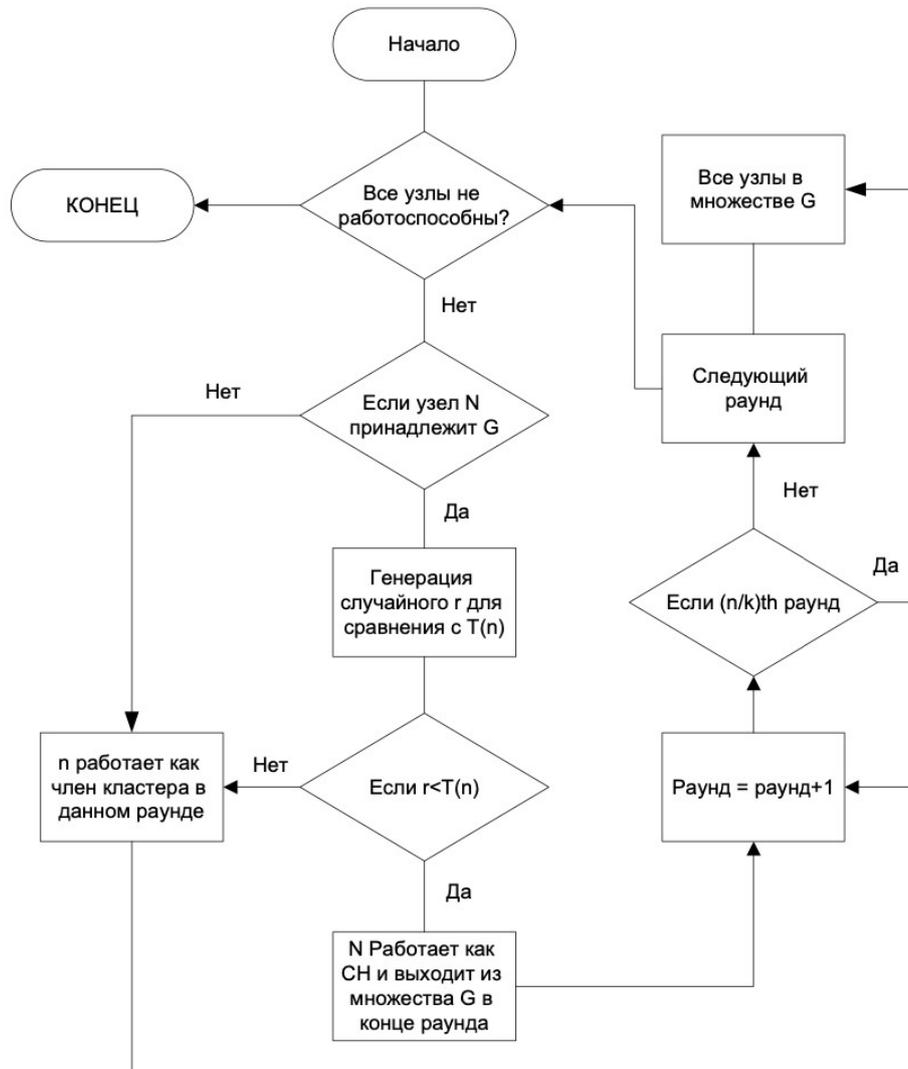


Рис. 2. Блок-схема протокола LEACH

Протокол PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) развивает идею LEACH, формируя цепочки из сенсорных узлов вместо кластеров [6, 7]. В каждой цепочке узлы передают данные соседям с последовательной агрегацией и передачей на БС только одним выбранным узлом, что снижает общее энергопотребление (рис. 3).

В качестве радиомодели используем типовую модель для БСС, приведенную на рисунке 4. Рассматриваемая модель описывается следующими уравнениями:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec}k + E_{amp}kd^2,$$

$$E_{RX}(k) = E_{RX-elec}(k) \cdot E_{RX}(k),$$

где  $E_{TX}$  — энергия, затрачиваемая на передачу;  $E_{RX}$  — энергия, потребляемая при приеме;  $E_{TX-elec}$  и  $E_{RX-elec}$  — энергии, необходимые для работы электронной схемы передатчика и приемника;  $E_{amp}$  — энергия, необходимая для схемы усилителя;  $k$  — размер пакета;  $d$  — расстояние между передатчиком и приемником [7].

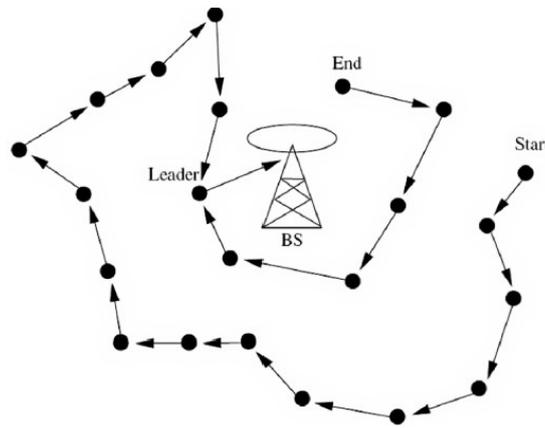


Рис. 3. Организация связи в протоколе PEGASIS

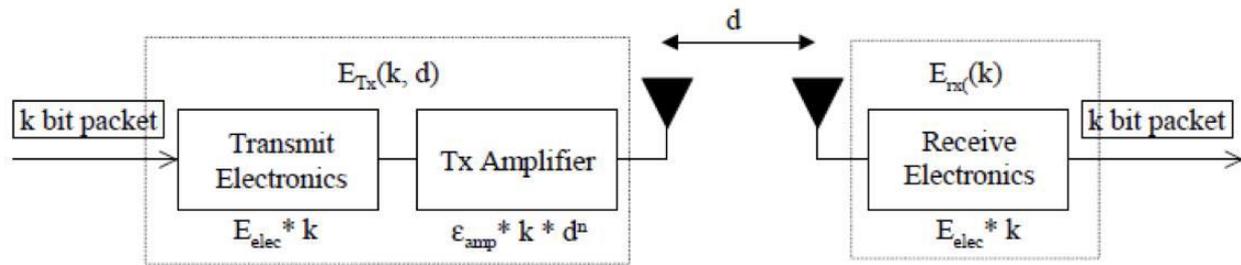


Рис. 4. Радиомодель для БСС [8, с. 3]

**Параметры и этапы моделирования**

Для оценки характеристик протоколов LEACH и PEGASIS было выполнено моделирование беспроводной распределенной сенсорной сети в программной среде MatLab. Параметры, использованные для моделирования, указаны в таблице 1. Расположение БС определено в центре моделируемой территории. Размер передаваемого сигнала установлен в 4000 бит, в то время как энергетические затраты на агрегацию данных определены в размере 5 нДж/бит. Узел классифицируется как «неработающий», когда его энергетический запас исчерпан до нуля.

Таблица 1

Параметры моделирования БСС

Параметр	Значение	Размерность
Количество сенсоров	800	шт
Размеры поля, где установлены сенсоры (в длину, в ширину)	10000, 200	м
Координаты БС (место расположения)	5000, 100	м
Начальная энергия сенсора	2	Дж
Энергия, затрачиваемая при передаче	50	нДж
Энергия, затрачиваемая для приема	50	нДж
Энергия сбора одного бита данных	5	нДж

На рисунке 5 представлен процесс моделирования работы протокола LEACH (а) и PEGASIS (б). По результатам моделирования на сравнительном графике (рис. 6) можно отметить, что, хотя жизненный цикл системы при использовании протокола PEGASIS составил порядка 650 раундов до полной потери всех окончательных устройств, что меньше, чем у протокола LEACH, у которого осталось 20 работающих сенсоров, все же число работоспособных узлов при PEGASIS примерно в 20–25 раз больше, чем при LEACH, что обеспечивает более равномерную работу системы и более равномерный выход из строя сенсоров.

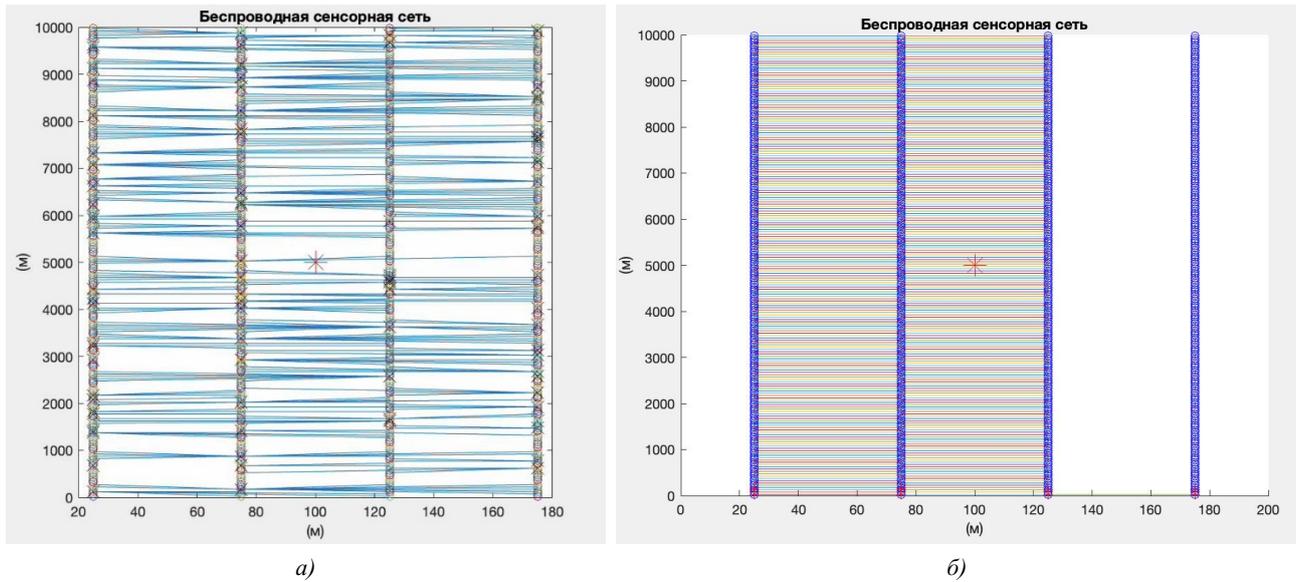


Рис. 5. Процесс моделирования работы протоколов LEACH (а) и PEGASIS (б)

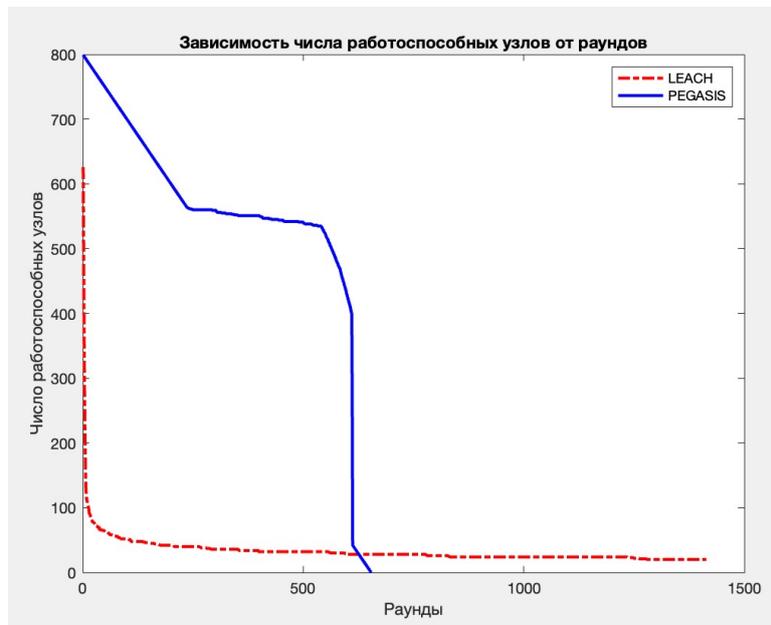


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования для поля размером 200x10000 м

Для анализа работы протоколов уменьшим длину поля с датчиками в два раза и также проведем анализ заданных параметров и работоспособности протоколов при меньшей дальности, энергетические характеристики при этом оставим неизменными.

По результатам моделирования (рис. 7) можем заметить такую же тенденцию, как и на поле длиной 10 километров. В самые первые раунды для протокола LEACH происходит массовая потеря датчиков из-за дальнего расстояния БС, к концу моделирования дееспособными сенсорами остаются те, которые находятся вблизи БС. Для протокола PEGASIS происходит довольно равномерный выход из строя системы, но в данном случае время жизни системы БСС в целом увеличилось более, чем в 2 раза.

Уменьшим длину поля с датчиками еще в два раза, а затем еще в пять раз и также проведем анализ заданных параметров и работоспособности протоколов при меньшей дальности, энергетические характеристики при этом оставим неизменными. Результаты моделирования для поля датчиков размером 200 на 2500 м представлены на рисунке 8(а), для поля размером 200 на 500 м — на рисунке 8(б).

Таблица 2

## Параметры моделирования БСС

Параметр	Значение	Размерность
Количество сенсоров	400	шт
Размеры поля, где установлены сенсоры (в длину, в ширину)	5000, 200	м
Координаты БС (место расположения)	2500, 100	м
Начальная энергия сенсора	2	Дж
Энергия, затрачиваемая при передаче	50	нДж
Энергия, затрачиваемая для приема	50	нДж
Энергия сбора одного бита данных	5	нДж

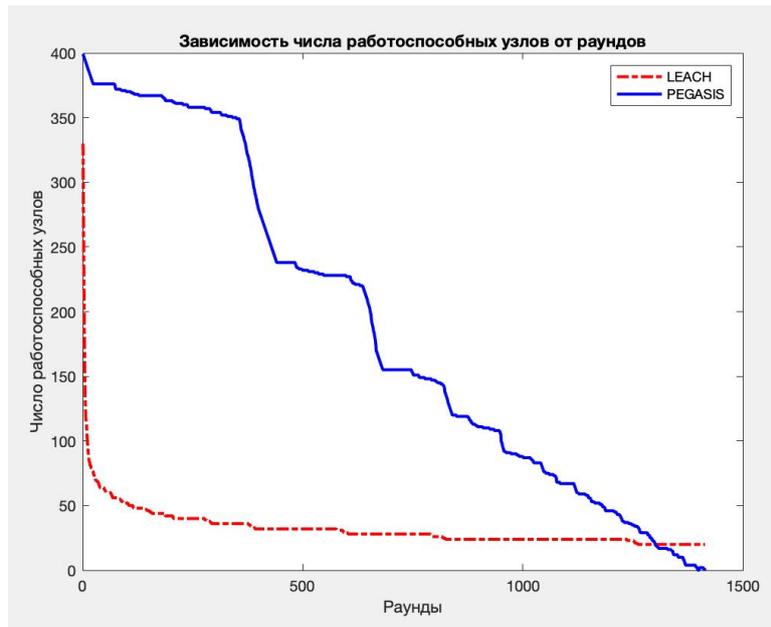
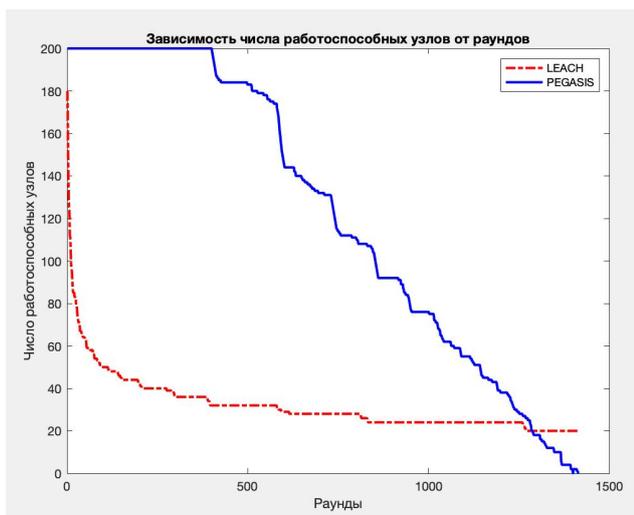
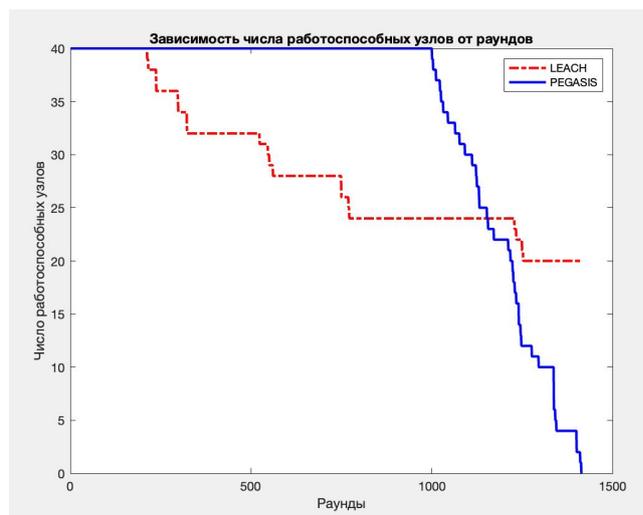


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования для поля размером 200x5000 м



а)



б)

Рис. 8. Сравнение результатов моделирования для: (а) поля размером 200x2500 м; (б) поля размером 200x500 м

На сравнительном графике, представленном на рисунке 8(а), можно отметить, что при использовании протокола LEACH, когда система лишилась уже более двух трети своих сенсоров, датчики при протоколе PEGASIS продолжают свою работу. Для варианта, изображенного на рисунке 8(б), при использовании протокола LEACH время жизни системы БСС в целом дольше, чем у PEGASIS, у которого на 1400 раунде не осталось работающих сенсоров, когда у протокола LEACH их насчитывалось порядка 20 штук. Однако протокол LEACH раньше, чем PEGASIS, стал терять свои датчики, до 1000 раунда система на базе PEGASIS работала без потерь.

### Заключение

Таким образом, в ходе моделирования было определено, что протокол LEACH более уместен и эффективен на территориальных участках, площадь которых составляет примерно  $0,1 \text{ км}^2$ , на примере поля размером  $200 \times 500 \text{ м}$ . То есть там, где БС будет находиться в более близкой доступности к головным узлам, так как именно на передаче данных от головных узлов до БС происходила наибольшая потеря активных сенсоров из-за необходимости преодоления больших расстояний. Соответственно, в таком случае, чтобы реализовать данный протокол на поле больших размеров, необходимо данную территорию оснащать большим количеством БС, распределенных на участке, то есть, возможно, каждые  $0,1 \text{ км}^2$  устанавливать БС, и система будет более эффективно справляться с поставленной задачей.

При этом же протокол PEGASIS продемонстрировал хорошую статистику времени жизни системы. Примечательно, что это устраняет необходимость в дополнительном полевом оборудовании, таком как БС или аналогичные устройства. Это связано с тем, что протокол передачи данных организован через соседние датчики. Следовательно, энергоэффективность повышается даже на значительных расстояниях в результате непосредственной близости узлов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks. *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences*. Hawaii, January, 2000.
2. Махров С. С. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях: иерархические, основанные на мобильности, мультиориентированные и основанные на гетерогенности. *T-Comm*. 2013;5:44–47. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/protokoly-marshrutizatsii-v-besprovodnyh-sensornyh-setyah-ierarhicheskie-osnovannye-na-mobilnosti-multiorientirovannye-i-osnovannye>.
3. Евстифеева Е. А., Семейкин В. Д. Методика выбора головного кластерного узла в беспроводной сенсорной сети на основе нечеткой логики. *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2018;1:81–89. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-v-ybora-golovnogo-klasterного-uzla-v-besprovodnoy-sensornoй-seti-na-osnove-nechetkoy-logiki>.
4. Безрук В. М., Власова В. А., Скорик Ю. В. Анализ протоколов маршрутизации беспроводной сенсорно-актуаторной сети и метод их выбора. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017;1:28–32. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-protokolov-marshrutizatsii-besprovodnoy-sensorno-aktuatornoy-seti-i-metod-ih-vybora>.
5. Bao Zhenshan, Xue Bo, Zhang Wenbo. HT-LEACH: An Improved Energy Efficient Algorithm Based on LEACH. *International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*. 2013. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6885155>.
6. Yadav L., Sunitha Ch. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy in Wireless Sensor Network (LEACH). *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2014;5(3).
7. Nadem Q., Javaid N., Mohammad S. Simple: Stable Increased – Throughput Multi-hop Protocol for Link Efficiency in Wireless Body Area Networks. *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA)*. France: Campiegne; 2013. P. 221–226.
8. Heinzelman Rabiner W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsen-Sor Networks. *System Sciences*. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on. IEEE; 2000.
9. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. *Сети связи пост-NGN*. СПб.: БХВ-Петербург; 2014. 160 с.