



Последние тенденции в развитии подводной беспроводной сенсорной сети: систематический обзор литературы

¹ А. Тарик, ORCID: 0000-0002-9994-3900 <atariq17@ce.ceme.nust.edu.pk>

¹ Ф. Азам, ORCID: 0000-0002-7421-7400 <farooq@ceme.nust.edu.pk>

¹ М.В. Анвар, ORCID: 0000-0002-1193-5683 <waseemanwar@ceme.nust.edu.pk>

¹ Т. Захур, ORCID: 0000-0003-1923-0087 <tzahoor17@ce.ceme.nust.edu.pk>

² А.В. Музаффар, ORCID: 0000-0001-7910-0378 <a.muzaffar@seu.edu.sa>

¹ Национальный научно-технологический университет (NUST),

Пакистан, 44000, г. Исламабад, NUST HQ, H-12

² Саудовский Университет электроники,
13323, Саудовская Аравия, Эр-Рияд, Ан Нурджис

Аннотация. Подводная беспроводная сенсорная сеть (Underwater Wireless Sensor Network, UWSN) – это новая технология мониторинга водных объектов, которая часто используется для сбора информации под водой, отбора проб в океане, выявления неопознанных движущихся объектов, предупреждения стихийных бедствий и обнаружения подводных лодок. В последнее время сети UWSN привлекают большое внимание исследователей как из академических, так и из промышленных кругов. В результате было проведено несколько исследований с целью усовершенствования методов, инструментов, протоколов и архитектуры UWSN. В связи с этим существует острая необходимость в изучении и обобщении современных тенденций развития UWSN в рамках одного исследования. Для достижения этой цели в данной статье проводится систематический обзор литературы, в котором комплексно анализируются последние разработки в области UWSN. В частности, было отобрано и проанализировано 34 научных исследования, опубликованных в период 2012–2020 гг. в области UWSN. В результате чего были определены 21 актуальный протокол маршрутизации и 11 инструментов. Кроме того, в контексте UWSN представлены пять различных типов архитектуры и три технологии средств коммуникации. Наконец, был проведен сравнительный анализ протоколов маршрутизации на основе значимых оценочных показателей. По итогам анализа был сделан вывод о том, что существуют отвечающие требованиям подходы, протоколы и инструменты для мониторинга посредством UWSN. Однако возможности верификации текущих подходов недостаточны для удовлетворения растущих требований к UWSN. Выводы, сделанные в этой статье, закладывают прочную основу для дальнейшего усовершенствования нынешних инструментов и методов, используемых в UWSN, для их реализации в крупных и сложных сетях.

Ключевые слова: подводные беспроводные сенсорные сети; систематический обзор литературы; протоколы; инструменты; сетевые симуляторы; архитектура

Для цитирования: Тарик А., Азам Ф., Анвар М.В., Захур Т., Музаффар А.В. Последние тенденции в развитии подводной беспроводной сенсорной сети: систематический обзор литературы. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 1, 2021 г., стр. 97–110. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-7

Recent Trends in Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) – A Systematic Literature Review

¹ A. Tariq, ORCID: 0000-0002-9994-3900 <atariq17@ce.ceme.nust.edu.pk>

¹ F. Azam, ORCID: 0000-0002-1193-5683 <farooq@ceme.nust.edu.pk>

¹ M.W. Anwar, ORCID: 0000-0002-1193-5683 <waseemanwar@ceme.nust.edu.pk>

¹ T. Zahoor, ORCID: 0000-0003-1923-0087 <tzahoor17@ce.ceme.nust.edu.pk>

² A.W. Muzaffar, ORCID: 0000-0001-7910-0378 <a.muzaffar@seu.edu.sa>

¹ National University of Sciences and Technology (NUST),

44000 NUST HQ, H-12, Islamabad, Islamabad Capital Territory, Pakistan

² Saudi Electronic University,

An Najjis, Riyadh, 13323 Saudi Arabia

Abstract. Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) is an emerging technology for the monitoring of aquatic assets and frequently applied in several domains like underwater information gathering, ocean sampling network, anonymous vehicles, disaster prevention and submarine detection. Recently, UWSNs have been getting significant attention of researchers from both academia and industry. As a result, several studies have been carried out to perform certain improvements in UWSNs techniques, tools, protocols and architectures. In this regard, there is a dire need to investigate and summarize the modern UWSNs trends altogether within a single study. To achieve this, a Systematic Literature Review (SLR) is performed in this article to comprehensively analyze the latest developments in UWSNs. Particularly, 34 research studies published during 2012–2020 have been selected and examined in the area of UWSNs. This leads to the identification of 21 modern routing protocols and 11 tools. Furthermore, 5 different architecture types and 3 communication media technologies are presented in the context of UWSNs. Finally, a comparative analysis of routing protocols is done on the basis of important evaluation metrics. It has been concluded that there exist adequate approaches, protocols and tools for the monitoring of UWSNs. However, the design verification capabilities of existing approaches are insufficient to meet the growing demands of UWSNs. The findings of this article provide solid platform to enhance the current UWSNs tools and techniques for large and complex networks.

Keywords: Underwater Wireless Sensor Networks; Systematic Literature Review; protocols; tools; network simulators; architectures; SLR; UWSNs

For citation: Tariq A., Azam F., Anwar M.W., Zahoor T., Muzaffar A.W. Recent Trends in Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) – A Systematic Literature Review. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 33, issue 1, 2021, pp. 97–110 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-7.

1. Введение

Подводная беспроводная сенсорная сеть (UWSN) — это сочетание беспроводной технологии и небольшого микромеханического сенсорного оборудования, обладающего функциями интеллектуального восприятия, вычисления и умных коммуникаций. Сети UWSN находят широкое применение при исследованиях под водой в научных, экологических и военных целях [1]. В последнее время было проведено несколько исследований с целью усовершенствования методов, инструментов, протоколов и архитектур UWSN. Имеется также несколько исследований [47], в которых рассматривается развитие беспроводных сенсорных сетей в целом, а не исключительно подводных. Кроме того, в последнее время проводятся исследования [35–38], в ходе которых изучаются различные аспекты UWSN, такие как проблемы маршрутизации, протокольные операции, технологии оценки и обеспечения. Однако, насколько нам известно, не существует исследования, в котором были бы проанализированы и изложены все последние достижения в области UWSN. Учитывая важность вопроса, мы провели систематический обзор литературы (Systematic Literature Review, SLR) за период с 2012-го по 2020-й гг., в рамках которого было рассмотрено 34 исследования, направленных на поиск решений следующих исследовательских вопросов (Research Question, RQ):

RQ1: Какие значительные исследования проводились в области UWSN в 2012-2020 гг.?
RQ2: Каковы основные протоколы маршрутизации, типы архитектуры и технологии связи, которые использовались для UWSN в ходе исследований 2012-2020 гг.?
RQ3: Какие инструменты/симуляторы регулярно использовались для UWSN в течение 2012-2020 гг.?
RQ4: Каковы перспективы развития в области UWSN?

В соответствии с критериями отбора материала (разд. 2) для выполнения данного систематического обзора литературы были использованы следующие четыре популярные научные базы данных: IEEE, Springer, ACM и Elsevier. Таким образом, было отобрано 34 исследования [1-34], связанные с UWSN. Результаты исследования приведены в разд. 3. И, наконец, в разд. 4 представлен анализ результатов исследования.

2. Методология исследования

Данное исследование проводится в соответствии с методическими указаниями по проведению систематического обзора литературы, сформулированными Барбарой Китченхэм (Barbara Kitchenham) [45], в которых неотъемлемым элементом является протокол обзора.

2.1 Критерии отбора материала

Для отбора исследований определены следующие четыре параметра, которые приводят к качественным результатам:

- 1) выбранные исследования должны быть связаны с UWSN;
- 2) выбранные исследования должны быть опубликованы в 2012-2020 гг.;
- 3) исследование выбирается только в том случае, если публикация проиндексирована в одной из следующих известных научных баз данных: IEEE, SPRINGER, ACM и ELSEVIER;
- 4) выбранные исследования должны быть ориентированы на результат и обеспечивать реальное решение ряда проблем UWSN.

В свою очередь, исследования, которые не соответствуют всем указанным выше параметрам отбора, не могут быть использованы.

2.2 Процесс поиска

Были выбраны четыре научные базы данных (т.е. IEEE, Springer, ACM и Elsevier) с целью найти достоверные и положительные результаты исследований из журналов с высоким импакт-фактором и материалов конференций. В ходе поиска материалов были использованы различные поисковые запросы, такие как «подводные беспроводные сенсорные сети», «протоколы UWSN», «подводные беспроводные акустические сети», «архитектура UWSN» и «разработка, управляемая моделью UWSN», приведенные в табл. 1.

Табл. 1. Поисковые запросы с результатами
Table 1. Search Terms with Results

№	Поисковый запрос	Результаты поиска (2012-2020)			
		IEEE	Springer	ACM	Elsevier
1	Подводные беспроводные сенсорные сети	1291	1202	955	1089
2	Протоколы UWSN	548	687	578	247
3	Подводные беспроводные акустические сети	1179	614	502	457

4	Архитектура UWSN	487	599	688	333
5	Разработка, управляемая моделью UWSN	246	362	187	638

Для получения релевантных результатов были применены различные фильтры, такие как логический оператор AND, фильтр по году (2012-2020) и др. В ходе анализа мы обнаружили, что лишь несколько исследований не соответствуют критериям отбора в полной мере. Например, результаты не были должным образом представлены в исследовании [48]. Кроме того, авторы исследования [49] не проводили анализ эффективности. Таким образом, по итогам детального анализа были исключены подобные исследования и, наконец, отобраны 34 исследования, которые полностью удовлетворяют критериям отбора (подраздел 2.1).

2.3 Оценка качества

Для обеспечения достоверности результатов данного систематического обзора литературы, мы старались максимально отбирать высококачественные исследования. Кроме того, было отобрано как можно больше новых исследований. На рис. 1 представлено распределение отобранных исследований по годам.

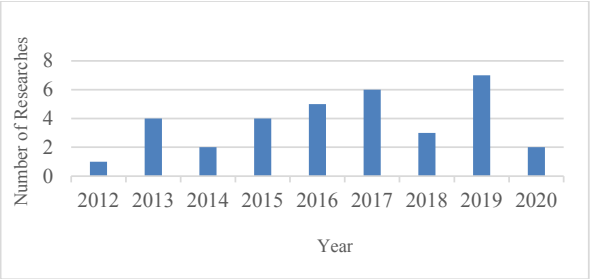


Рис. 1. Распределение отобранных исследований по годам
Fig 1. Yearly Distribution of Selected Researches

2.4 Извлечение данных

Для получения соответствующих данных были определены различные параметры их извлечения, как показано в табл. 2.

Табл. 2. Шаблон извлечения данных
Table 2. Template of Data Extraction

№	Описание	Подробная информация
1	Библиографическая информация	Авторы исследования, название, год издания и вид исследования (т.е. журнал/конференция).
Извлечение данных		
2	План	Основная цель выбранного исследования, например, назначение предлагаемого подхода и соответствующего инструмента/протокола в контексте подводных беспроводных сенсорных сетей.
3	Результаты	Результаты выбранных исследований
4	Предположения	Используется количественный или качественный метод
5	Проверка	Оценка результатов, например, тематическое исследование и т.д.

Синтез данных		
6	Категоризация	Соотнесение выбранного исследования с заранее определенной категоризацией (табл. 3)
7	Инструменты	Инструменты, используемые в подводных беспроводных сенсорных сетях (табл. 4)
8	Типы архитектуры	Типы архитектуры, используемые в подводных беспроводных сенсорных сетях (табл. 5)
9	Протоколы и методы оптимизации	Протоколы с соответствующей техникой оптимизации, используемые в каждом выбранном исследовании (табл. 6).
10	Коммуникационные технологии	Коммуникационные технологии, используемые в подводных беспроводных сенсорных сетях (табл. 7)
11	Оценка эффективности каждого из предложенных протоколов	Каждый протокол оценивается по матрице эффективности (табл. 8)

3. Результаты

В данном разделе изложены результаты, полученные по итогам проведения выбранных исследований. В частности, категоризация отдельных исследований приводится в подразделе 3.1. Кроме того, указанные инструменты, архитектуры, протоколы и технологии связи представлены в подразделах 3.2, 3.3, 3.4 и 3.5 соответственно.

3.1 Категоризация выбранных исследований

Мы разделили 34 отобранных исследования на пять групп по их соответствию целевым показателям качества, как указано в табл. 3.

Табл. 3. Категории исследований в соответствии с их целями
Table 3. Categories of Researches on the Basis of Targeted Objective

№	Категория	Источник
1	Энергопотребление	[2][4][7][8][9][10][14][16][17][21][23][25][28][33][34]
2	Локализация	[1][3][6][13][15][18][26][27][31]
3	Время выполнения	[11]
4	Использование системы	[19][20][30]
5	Пропускная способность	[5][12][22][24][29][32]

Описание этих категорий выглядит следующим образом.

- I. Категория *Энергопотребление* включает в себя исследования, в которых предлагаются меры для снижения энергопотребления в соответствии со структурой UWSN. Энергопотребление является высоко значимой характеристикой [39] беспроводных сетей.
- II. Категория *Размещение* включает в себя исследования, направленные на повышение точности размещения узлов в UWSN.
- III. *Время выполнения* является важным показателем качества в беспроводных сетях [43] и других областях [42]. Таким образом, категория *Время выполнения* включает в себя те

- отобранные исследования, в которых время передачи пакетов данных является целевым показателем, когда количество узлов превышено.
- IV. Категория *Использование системы* включает в себя отдельные исследования, которые направлены на оптимизацию использования сетей путем применения различных стратегий размещения в UWSN.
 - V. В категории *Пропускная способность* рассматриваются исследования, целью которых является повышение коэффициента доставки пакетов в UWSN.

3.2 Инструменты/симуляторы

В случае с UWSN тестирование любой методики/алгоритма является дорогостоящим и трудным с точки зрения реализации в глубоководных частях океана. Таким образом, прежде чем перейти к фактическому развертыванию UWSN, важно провести тестирование. В 34 отобранных исследованиях мы выявили 11 инструментов/симуляторов, использованных для проведения анализа до фактического развертывания, как указано в табл. 4. Как видно из данных табл. 4, наиболее часто используемым инструментом в UWSN является сетевой симулятор (Network Simulator, NS). В частности, NS2 – это старая версия сетевого симулятора, которая теперь заменена на новую версию NS3. Лишь в немногих отобранных исследованиях сообщалось об использовании NS2. Более распространенным все же было использование NS3. Таким образом, в табл. 4 мы объединяем все исследования в рамках сетевого симулятора (как NS2, так и NS3 версии).

Симуляторы играют важную роль в сложной среде UWSN, так как они позволяют проверить проект сети перед ее фактическим развертыванием. К тому же, модельно-управляемый подход обеспечивает возможность повторного использования и облегчает проверку проекта сети [44]. Для достижения желаемой конструктивной простоты UWSN можно системно использовать концепции модельно-управляемого подхода. Например, NS3 – это симулятор, который зависит от платформы, в то время как при модельно-управляемом подходе используются модели, независимые от платформы. В связи с этим независимая от платформы модель может быть автоматически преобразована в модель, зависящую от платформы [46], как например, NS3 для моделирования среды UWSN. Комбинация модельно-управляемого подхода с использованием инструментов UWSN, безусловно, может упростить процесс моделирования и верификации сети. Однако подобная комбинация все еще нуждается в дальнейшем изучении.

Табл. 4. Инструменты/симуляторы UWSN
Table 4. Identification of UWSNs Tools / Simulators

№	Инструменты/симуляторы	Доступность	Источник
1	Сетевой симулятор (версии NS2 и NS3)	С открытым исходным кодом	[1] [2] [5][7] [9][11] [12][18][19][21][22][25][26] [27][28][29] [31][32][33][34]
2	AquaSim	С открытым исходным кодом	[3][5][7][18][22][25][26][34]
3	Matlab	Коммерческий	[3][10][17]
4	QualNet	Коммерческий	[6][8][11]
5	J-Sim	С открытым исходным кодом	[11]

6	SUNSET SDCS	С открытым исходным кодом	[23]
7	GME (Generic Modeling Environment)	С открытым исходным кодом	[30]
8	Eclipse Modeling Framework (EMF)	С открытым исходным кодом	[31]
9	DigitizeIt	С открытым исходным кодом	[11]
10	OPNET	Коммерческий	[16][11]
11	GloMoSim	Коммерческий	[11]

3.3 Архитектура UWSN

Из 34 отобранных исследований мы выделили четыре типа коммуникационной архитектуры UWSN: одномерную, двухмерную, трехмерную и четырехмерную. Классификация отобранных исследований по типу архитектуры приведена в табл. 5. Существуют исследования, которые вводят новые типы архитектуры, однако подробная информация по ним не приводится. Подобные типы архитектуры классифицированы как «Другие» (см. табл. 5).

Табл. 5. Коммуникационная архитектура UWSN
Table 5. UWSN Communication Architectures

№	Типы архитектуры	Источник
1	Одномерная (1D)	[3][8]
2	Двухмерная (2D)	[1][13] [25][28]
3	Трехмерная (3D)	[2][4][6][9][16][17][20][21][24][26][27][29][33]
4	Четырехмерная (4D)	[1][6][7]
5	Другие	[5] [8]

3.4 Протоколы маршрутизации

Мы выявили 21 важный протокол маршрутизации и соответствующую технику оптимизации, указанные в табл. 6.

Табл. 6. Протоколы маршрутизации и соответствующая оптимизация
Table 6. Routing protocols and corresponding optimization

Источник	Протокол	Технология оптимизации
[1]	Hop-by-Hop Dynamic Addressing Based (H2-DAB)	Алгоритм последовательной динамической адресации
[2]	Adaptive hop-by-hop Vector-Based Forwarding (АНН-VBF)	Технология адаптирующейся переадресации/передачи пакета
[5]	Geographic Routing Protocol	Жадная стратегия произвольной географической переадресации
[6]	Маршрутизация с учетом давления пустот (VAPR)	Жадный подход к гибкой переадресации

[7]	Geographic and Opportunistic Routing	Жадная гибкая стратегия переадресации с корректировкой глубины
[8]	HydroCast	Восстановление пустот с жадной гибкой переадресацией
[9]	Agent Based Approach (ABA)	Установление маршрута на основе энергии узла и количества переходов
[19]	Dynamic Reservation Access Protocols	Подход к динамическому резервированию множественного доступа с учетом состояния системы
[20]	Enhanced CARP (E-CARP)	Жадная последовательная стратегия маршрутизации, независимая от местоположения
[21]	Energy-Aware and Void-Avoidable Routing Protocol (EAVARP)	Стратегия гибкой переадресации, основанная на избегании пустотных участков
[22]	Deep Q-Network-Based Energy- and Latency-Aware (DQELR)	Алгоритм глубокой Q-сети с методами off-policy и on-policy
[23]	Channel-Aware Reinforcement Learning-Based Multi-Path (CARMA)	Фреймворк распределенного обучения с подкреплением
[24]	Proactive Routing Approach with Energy efficient Path	Алгоритм Дейкстры с вертикальным наложением и формированием кластеров
[25]	Energy-Efficient Multipath Grid-based Geographic Routing (EMGGR)	Алгоритм выбора шлюза с механизмами переадресации пакетов
[26]	Energy-Efficient Localization-Based Geographic Routing (EEL)	Локализация NADV (нормализованное продвижение) и TOA (время прибытия)
[27]	Improved VBF (Vector Routing Forwarding)	Географическая стратегия маршрутизации с радиусом маршрутной трубки
[28]	Multi-Layered Routing Protocol (MRP)	Механизм маршрутизации, не зависящий от локализации
[29]	Grid Division Polar Tracing (GDPT)	Жадный алгоритм с использованием модели кубической сетки и полярным отслеживанием
[32]	On-Surface Wireless-Assisted Opportunistic (SurOpp)	Гибкая маршрутизация в буйковых узлах
[33]	Energy Efficient Data Gathering (EEDG)	Подход с использованием информации о глубине и переадресующих узлов
[34]	Dynamic Firefly Mating Optimization Inspired Routing Protocol (FFRP)	Самообучающийся динамический интеллектуальный алгоритм оптимизации Firefly Mating

В настоящее время существует тенденция к глубокому машинного обучения в области управления проблемами маршрутизации [40]. В связи с этим авторы [22] объединили нейронную сеть с Q-обучением для принятия глобально оптимального решения о

маршрутизации. В другом исследовании используется самообучающаяся динамическая интеллектуальная технология оптимизации *firefly mating* [34] для определения высокостабильных и безопасных путей маршрутизации пакетов в UWSN через коммуникационные пустоты и теневые зоны.

3.5 Коммуникационные технологии UWSN

В табл. 7 приведены краткие характеристики трех коммуникационных технологий (акустической, оптической электромагнитной), которые часто применяются в UWSN [41]. Каждая коммуникационная технология оценивается по различным атрибутам, в частности, по дальности связи и скорости передачи данных. Аналогично «задержка» означает задержку в передаче данных UWSN, а «мощность передачи» – потребление энергии во время передачи данных. «Затраты» подразумевает под собой затраты на развертывание и операционную деятельность каждой технологии. «Направленность» может означать всенаправленную приемопередачу, при которой сигнал передается и принимается с любого из возможных направлений, или однонаправленную приемопередачу, при которой сигнал передается или принимается только в одном направлении. Наконец, «потеря на пути распространения сигнала (затухание)» и «энергопотребление» [8] [12] [15] представляют собой соответствующие понятия каждой коммуникационной технологии.

Наш анализ показывает, что в настоящее время акустическая технология является основной технологией, используемой в UWSN. В частности, в девяти отобранных исследованиях ([5][6][8][12][13][14][15][17][18]) используется только акустическая технология связи. В одном исследовании [10] используется комбинация акустической и оптической технологий. В девяти исследованиях ([1][2][3][7][9][16][26][32][33]) используется комбинация акустических и радиочастотных технологий. Наконец, только в трех исследованиях ([4][11][34]) используется исключительно радиочастотная технология.

Табл.7. Сравнение различных технологий подводной связи
Table.7. Comparison of different Underwater Communication Technologies

Технологии	Дальность связи	Скорость передачи данных	Задержка	Энергопотребление	Мощность передачи	Затраты	Затухание	Направление
Акустическая	<20 км	<10 кбит/с	Высокая	100 бит/Дж	≈ 10 Вт	Высокие	Высокое	Все
Оптическая	100—200 м	<10 Гбит/с	Низкая	30 000 бит/Дж	≈ 1 Вт	Высокие	Зависит от прозрачности	Одно
Электромагнитная (радиочастотная)	< 100 м	<0,1 Гбит/с	Умеренная	Н/Д	≈ 100 Вт	Низкие	Умеренное	Все

4. Анализ

В этом разделе представлен анализ эффективности и оценка выявленных протоколов маршрутизации в UWSN. Рассматриваются шесть параметров оценки: энергоэффективность, коэффициент доставки, сквозная задержка, экономическая эффективность, мобильность узлов и интеграция с подводными протоколами MAC. Это позволяет провести полное сравнение протоколов маршрутизации, результаты которого приведены в табл. 8.

Табл. 8. Качественный анализ предлагаемых протоколов маршрутизации с помощью показателей эффективности
Table 8. Qualitative Analysis of Proposed Routing Protocols through Performance Metrics

Источник	Протокол	Энергоэффективность	Коэффициент доставки	Сквозная задержка	Экономическая эффективность	Мобильность узлов	Интеграция с протоколами MAC
[1]	H2-DAB	Средняя	Средний	Низкая	Низкая	Высокая	IEEE 802.11
[2]	AHH-VBF	Высокая	Средний	Низкая	Низкая	Нет данных	Aloha
[5]	Geographic routing protocol	Средняя	Высокий	Средняя	Средняя	Нет данных	CSMA
[6]	VAPR	Нет данных	Высокий	Низкая	Нет данных	Высокая	CSMA
[7]	GEDAR	Высокая	Высокий	Средняя	Высокая	Средняя	CSMA
[8]	HydroCast	Высокая	Высокий	Низкая	Средняя	Средняя	CSMA
[9]	ABA	Высокая	Средний	Средняя	Высокая	Нет данных	
[19]	Dynamic reservation access protocols	Высокая	Нет данных	Низкая	Средняя	Средняя	Aloha
[20]	E-CARP	Высокая	Средний	Нет данных	Средняя	Высокая	Нет данных
[21]	EAVARP	Средняя	Средний	Низкая	Нет данных	Высокая	Нет данных
[22]	DQELR	Высокая	Средний	Средняя	Нет данных	Высокая	Нет данных
[23]	CARMA	Высокая	Высокий	Низкая	Нет данных	Нет данных	Нет данных
[24]	PA-EPS-Case I	Средняя	Высокий	Средняя	Низкая	Средняя	Нет данных
[25]	EMGGR	Высокая	Высокий	Низкая	Нет данных	Средняя	Нет данных
[26]	EEL	Высокая	Высокий	Средняя	Средняя	Низкая	Нет данных
[27]	Improved VBF Algorithm	Высокая	Высокий	Нет данных	Нет данных	Высокая	Нет данных
[28]	MRP	Высокая	Высокий	Средняя	Нет данных	Низкая	802.11-DYNAV
[29]	GDPT	Высокая	Высокий	Низкая	Средняя	Средняя	Нет данных
[32]	SurOpp	Высокая	Высокий	Низкая	Высокая	Средняя	CSMA, IEEE 802.11n
[33]	EEDG	Высокая	Средний	Низкая	Нет данных	Нет данных	Нет данных
[34]	FFRP	Высокая	Высокий	Низкая	Нет данных	Нет данных	CSMA

Теперь мы можем ответить на все RQ, указанные в разделе 1. В частности, ответ на RQ1 приведен в табл. 3. Ответ на RQ2 можно найти в табл. 5, 6 и 7. Ответ на RQ3 содержится в табл. 4. Наконец, отвечая на RQ4, можно сказать, что благодаря технологическому и экономическому прогрессу, UWSN вызывает особый интерес у исследователей и представителей промышленности. За последние несколько десятилетий в этой области было разработано множество систем предупреждения, защиты и мониторинга в режиме реального

времени. Однако из-за неизбежных ограничений UWSN реализация полноценных решений и приложений в данной области является затруднительным. К подобным сдерживающим факторам относятся ограниченные аппаратные ресурсы (вычислительная мощность, хранилище), ненадежность коммуникационных технологий, длительное и нерегулярное затухание, ограниченный срок службы сети, фиксированная пропускная способность, шум, физическая восприимчивость, сетевые атаки и ошибки при передаче данных. Для устранения данных ограничений необходимо разработать более продвинутые инструменты и протоколы для управления будущими сложными UWSN.

Несмотря на то, что мы следовали стандартным рекомендациям систематического обзора литературы [45], существует небольшая вероятность того, что мы могли упустить некоторые исследования, опубликованные в других базах данных, таких как Taylor & Francis и др. Но были рассмотрены четыре авторитетные научные базы данных, такие как IEEE, Springer, ACM и Elsevier. Таким образом, результаты данного систематического обзора литературы надежные, и отсутствие нескольких исследований из других источников не оказывает существенного влияния на общие результаты.

5. Заключение

В данной статье представлен систематический обзор литературы (SLR) для изучения текущих приложений и разработок в области UWSN. Отобраны и тщательно проанализированы 34 исследования, опубликованные в течение 2012-2020 гг. В результате было выявлено 11 инструментов, 21 протокол маршрутизации с соответствующими методами оптимизации, пять типов внутренней архитектуры и три коммуникационные технологии.

Впоследствии был проведен сравнительный анализ протоколов маршрутизации. По его итогам можно сделать вывод, что NS2/NS3 с AquaSim являются самыми надежными симуляторами/инструментами для UWSN. Кроме того, в последнее десятилетие интенсивно используются трехмерные (3D) коммуникационные архитектуры. Акустическая технология является основной коммуникационной технологией, используемой в настоящее время в UWSN.

Наконец, в ходе исследования было обнаружено, что такие показатели производительности, как энергоэффективность, коэффициент доставки, сквозная задержка, экономическая эффективность, мобильность узлов и интеграция с подводным протоколом MAC, имеют достаточно важное значение при выборе правильных протоколов маршрутизации в соответствии с требованиями.

Детальная и надежная проверка UWSN перед фактическим ее развертыванием крайне необходима. В связи с этим требуется более детальный анализ инструментов, чтобы выявить конкретные преимущества и ограничения. Такой подробный анализ инструментов UWSN мы планируем провести в следующей статье.

Список литературы / References

- [1]. Muhammad Ayaz, Azween Abdullah, Ibrahim Faye, Yasir Batira. An efficient Dynamic Addressing based routing protocol for Underwater Wireless Sensor Networks. *Computer Communications*, vol. 35, issues 4, 2012, pp. 475-486.
- [2]. Haitao Yu, Nianmin Yao, Jun Liu. An adaptive routing protocol in underwater sparse acoustic sensor networks. *Ad Hoc Networks*, vol. 34, 2015, pp. 121-143.
- [3]. Anjana P Das, Sabu M Thampi. Fault-resilient localization for underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, vol. 55, 2017, pp. 132-142.
- [4]. Jun Liu, Zhong Zhou, Zheng Peng et al. Mobi-Sync: Efficient Time Synchronization for Mobile Underwater Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, issue 2, 2013, pp. 406-416.

- [5]. Rodolfo W.L. Coutinho, Azzedine Boukerche, Luiz F.M. Vieira, Antonio A.F. Loureiro. A novel void node recovery paradigm for long-term underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, vol. 34, 2015, pp. 144-156.
- [6]. Youngtae Noh, Uichin Lee, Paul Wang et al. VAPR: Void-Aware Pressure Routing for Underwater Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, issue 5, 2013, pp. 895-908.
- [7]. Rodolfo W. L. Coutinho, Azzedine Boukerche, Luiz F. M. Vieira, Antonio A. F. Loureiro. GEDAR: Geographic and Opportunistic Routing Protocol with Depth Adjustment for Mobile Underwater Sensor Networks. In *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 251-256.
- [8]. Youngtae Noh, Uichin Lee, Saewoom Lee et al. HydroCast: Pressure Routing for Underwater Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, issue 1, 2016, pp. 333-347.
- [9]. Manjula R. Bharamagoudra, SunilKumar S. Manvi, Bilal Gonen. Event driven energy depth and channel aware routing for underwater acoustic sensor networks: Agent oriented clustering based approach. *Computers & Electrical Engineering*, vol. 58, 2017, pp. 1-19.
- [10]. Hainan Chen, Xiaoling Wu, Guangcong Liu, Yanwen Wang. A Novel Multi-Module Separated Linear UWSNs Sensor Node. *IEEE Sensors Journal*, volume 16, issue 11, 2016, pp. 4119-4126.
- [11]. Mukhtar Ghaleb, Emad Felemban, Shamala Subramaniam et al. A Performance Simulation Tool for the Analysis of Data Gathering in Both Terrestrial and Underwater Sensor Networks. *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 4190-4208.
- [12]. Zhenghao Xi, Xiu Kan, Le Cao et al. Research on Underwater Wireless Sensor Network and MAC Protocol and Location Algorithm. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 56606-56616.
- [13]. Inam Ullah, Yiming Liu, Xin Su, Pankoo Kim. Efficient and Accurate Target Localization in Underwater Environment. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 101415-101426.
- [14]. Bingbing Zhang, Yiyin Wang, Hongyi Wang et al. Tracking a Duty-Cycled Autonomous Underwater Vehicle by Underwater Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 18016-18032.
- [15]. Inam Ullah, Jingyi Chen, Xin Su et al. Localization and Detection of Targets in Underwater Wireless Sensor Using Distance and Angle Based Algorithms. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 45693-45704.
- [16]. Do Duy Tan, Tung Thanh Le, Dong-Seong Kim. Distributed Cooperative Transmission for Underwater Acoustic Sensor Networks. In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2013, pp. 205-210.
- [17]. S. Mohamad Dehnavi, Moosa Ayati, Mohammad Reza Zakerzadeh. Three Dimensional Target Tracking via Underwater Acoustic Wireless Sensor Network. In *Proc. of the Conference on Artificial Intelligence and Robotics (IRANOPEN)*, 2017, pp. 153-157.
- [18]. Jun Liu, Zhaoxue Wang, Jun-Hong Cui et al. A Joint Time Synchronization and Localization Design for Mobile Underwater Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, issue 3, 2016, pp. 530-543.
- [19]. Priyatosh Mandal, Swades De. New Reservation Multiaccess Protocols for Underwater Wireless Ad Hoc Sensor Networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 40, issue 2, 2015, pp. 277-291.
- [20]. Zhangbing Zhou, Beibei Yao, Riliang Xing et al. E-CARP: An Energy Efficient Routing Protocol for UWSNs in the Internet of Underwater Things. *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, issue 11, 2016, pp. 4072-4082.
- [21]. Zhuo Wang, Guangjie Han, Hongde Qin et al. An Energy-Aware and Void-Avoidable Routing Protocol for Underwater Sensor Networks. *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 7792-7801.
- [22]. Yishan Su, Rong Fan, Xiaomei Fu, Zhigang Jin. DQELR: An Adaptive Deep Q-Network-Based Energy- and Latency-Aware Routing Protocol Design for Underwater Acoustic Sensor Networks. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 9091-9104.
- [23]. Valerio Di Valerio, Francesco Lo Presti, Chiara Petrioli et al. CARMA: Channel-Aware Reinforcement Learning-Based Multi-Path Adaptive Routing for Underwater Wireless Sensor Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, issue 11, 2019, pp. 2634-2647.
- [24]. Zahoor Ali Khan, Muhammad Awais, Turki Ali Alghamdi et al. Region Aware Proactive Routing Approaches Exploiting Energy Efficient Paths for Void Hole Avoidance in Underwater WSNs, *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 140703-140722.
- [25]. Faiza Al Salti, N. Alzeidi, Bassel R. Arafeh. EMGGR: an energy-efficient multipath grid-based geographic routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Wireless Networks*, vol. 23, issue 4, 2017, pp. 1301-1314.
- [26]. Kun Hao, Haifeng Shen, Yonglei Liu et al. Integrating Localization and Energy-Awareness: A Novel Geographic Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks. *Wireless Networks*, vol. 23, issue 5, 2018, 1427-1435.

- [27]. Sayyed Majid Mazinani, Hadi Yousefi, Mostafa Mirzaie. A Vector-Based Routing Protocol in Underwater Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, vol. 100, 2018, pp. 1569-1583.
- [28]. Abdul Wahid, Sungwon Lee, Dongkyun Kim, Kyung-Shik Lim. MRP: A Localization-Free Multi-Layered Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, vol. 77, 2014, pp. 2997-3012.
- [29]. Balaji Vijayan Venkateswarulu, Nedunchelivan Subbu, Sivakumar Ramamurthy. An efficient routing protocol based on polar tracing function for underwater wireless sensor networks for mobility health monitoring system application. *Journal of Medical Systems*, vol. 43, 2019, article no. 18.
- [30]. C. Srimathi, Soo-Hyun Park, N. Rajesh. Proposed framework for underwater sensor cloud for environmental monitoring. In *Proc. of the Fifth Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 2013, pp. 104-109.
- [31]. Charbel Geryes Aoun, Iyas Alloush, Yvon Kermarrec et al. A Mapping Approach for Marine Observatory Relying on Enterprise Architecture. In *Proc. of the OCEANS - MTS/IEEE Washington*, 2015, pp. 1-10.
- [32]. Miaomiao Liu, Fei Ji, Quansheng Guan et al. On-Surface Wireless-Assisted Opportunistic Routing for Underwater Sensor Networks. In *Proc. of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems*, 2016, pp. 1-5.
- [33]. Fatemeh Banaeizadeh, Abolfazl Toroghi Haghighat. An energy-efficient data gathering scheme in underwater wireless sensor networks using a mobile sink. *International Journal of Information Technology*, vol. 12, 2020, pp. 513-522.
- [34]. Muhammad Faheem, Rizwan Aslam Butt, Basit Raza et al. FFRP: Dynamic Firefly Mating Optimization Inspired Energy Efficient Routing Protocol for Internet of Underwater Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 39587-39604.
- [35]. Mukhtiar Ahmed, Mazleena Salleh, M. Ibrahim Channa. Routing protocols based on node mobility for Underwater Wireless Sensor Network (UWSN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 78, 2017, pp. 242-252.
- [36]. Mukhtiar Ahmed, Mazleena Salleh, M. Ibrahim Channa. Routing protocols based on protocol operations for underwater wireless sensor network: A survey. *Journal of Egyptian Informatics Journal*, vol. 19, issue 1, 2018, pp. 57-62.
- [37]. Mohammed Jouhari, Khalil Ibrahim, Hamidou Tembine, Jalel Ben-Othman. Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 96879-96899.
- [38]. Rodolfo W.L. Coutinho, Azzedine Boukerche. Data Collection in Underwater Wireless Sensor Networks: Research Challenges and Potential Approaches. In *Proc. of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 2017, pp. 5-8.
- [39]. Thinakaran Vasantha Chithra, Arulappan Milton. Energy Proficient Flooding Scheme Using Reduced Coverage Set Algorithm for Unreliable Links. *Programming and Computer Software*, vol. 44, issue 6, 2018, pp. 381-387.
- [40]. D. Sreenivasulu, P.V. Krishna. Deep Learning Based Efficient Channel Allocation Algorithm for Next Generation Cellular Networks. *Programming and Computer Software*, vol. 44, issue 6, 2018, pp. 428-434.
- [41]. Mohammad Furqan Ali, Dushantha Nalin K. Jayakody, Yury A. Chursi et al. Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, 2019, pp. 1379-1412.
- [42]. Р. Массобрио, С. Несмачнов, А. Черных и др. Применение облачных вычислений для анализа данных большого объема в умных городах. *Труды ИСП РАН*, том 28, вып. 6, 2016 г., стр. 121-140. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(6)-9 / R. Massobrio, S. Nesmachnow, A. Tchernykh et al. Towards a Cloud Computing Paradigm for Big Data Analysis in Smart Cities. *Programming and Computer Software*, vol. 44, issue 6, 2018, pp. 181-189.
- [43]. В.П. Козырев. Методы оценки времени выполнения в системах реального времени. *Программирование*, том 42, no. 1, 2016 г., стр. 39-50 / V.P. Kozurev. Estimation of the execution time in real-time systems. *Programming and Computer Software*, vol. 42, issue 1, 2016, pp. 41-48.
- [44]. M.W. Anwar, M. Rashid, F. Azam et al. A model-driven framework for design and verification of embedded systems through SystemVerilog. *Design Automation for Embedded Systems*, vol. 23, 2019, pp. 179-223.
- [45]. B. Kitchenham. Procedures for Performing Systematic Reviews. Joint Technical Report. Keele University, Empirical Software Engineering National ICT Australia Ltd., 2004, 33 p.
- [46]. М.Б. Кузнецов. Трансформация UML-моделей и ее использование в технологии MDA. *Программирование*, том 33, no. 1, 2009 г., стр. 65-79 / M.B. Kuznetsov. UML model transformation

- and its application to MDA technology. *Programming and Computer Software*, vol. 33, issue 1, 2007, pp. 44-53.
- [47]. Muhammad Waseem Anwar, Farooque Azam, Muazzam A. Khan, and Wasi Haider Butt. The Applications of Model Driven Architecture (MDA) in Wireless Sensor Networks (WSN) – Techniques and Tools. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 69, 2019, pp. 14-27.
- [48]. Konstantinos Skiadopoulos, Athanasios Tsiptis, Konstantinos Giannakis et al. Synchronization of data measurements in wireless sensor networks for IoT application. *Ad Hoc Networks*, vol. 89, 2019, pp. 47-57.
- [49]. Sudeep Varshneya, Chiranjeev Kumara, Abhishek Swaroop. Leach Based Hierarchical Routing Protocol for Monitoring of Overground Pipelines Using Linear Wireless Sensor Networks. In *Proc. of the 6th International Conference on Smart Computing and Communications*, 2017, pp. 208-214.

Информация об авторах / Information about authors

Аиша ТАРИК – студент магистратуры кафедры вычислительной техники и программной инженерии электротехнического и машиностроительного колледжа. Область научных интересов: проектирование на основе моделей и беспроводные сенсорные сети.

Ayesha TARIQ, Master's Student at the Department of Computer and Software Engineering, College of Electrical and Mechanical Engineering. Research interests include Model Driven Engineering and Wireless Sensor Networks.

Фарук АЗАМ – кандидат наук, профессор кафедры вычислительной техники и программной инженерии электротехнического и машиностроительного колледжа. Область научных интересов: проектирование на основе моделей, Web-разработка и беспроводные сенсорные сети.

Farooque AZAM, PhD, Professor at the Department of Computer and Software Engineering, College of Electrical and Mechanical Engineering. Research interests include Model Driven Engineering, Web Development and Wireless Sensor Network.

Мухаммад Васим АНВАР – кандидат наук, старший научный сотрудник кафедры вычислительной техники и программной инженерии электротехнического и машиностроительного колледжа. Область научных интересов: проектирование на основе моделей, встраиваемые системы, управляющие системы и беспроводные сенсорные сети.

Muhammad Waseem ANWAR, PhD, Senior Researcher at the Department of Computer and Software Engineering, College of Electrical and Mechanical Engineering. Research interests include Model Driven Engineering, Embedded Systems, Control Systems and Wireless Sensor Networks.

Тайиба ЗАХУР – студент магистратуры кафедры вычислительной техники и программной инженерии электротехнического и машиностроительного колледжа. Область научных интересов: проектирование на основе моделей и облачные вычисления.

Tayyba ZAHOR, Master's Student at the Department of Computer and Software Engineering, College of Electrical and Mechanical Engineering. Research interests include Model Driven Engineering and Cloud Computing.

Абдул Вахаб МУЗАФФАР – кандидат наук, доцент кафедры информационных технологий Колледжа вычислительной техники и информатики. Область научных интересов: программная инженерия, интеллектуальный анализ данных и текстов, машинное обучение, электронное обучение, биомедицинские и биоинформационные системы.

Abdul Wahab MUZAFFAR, PhD in Software Engineering, Assistant Professor, Departement of IT, College of Computing and Infomatics. Research interests include Software Engineering, Data and Text Mining, Machine Learning, eLearning, Biomedical and bio informatics systems.