

УДК 551.568.85

Попеляєв Д. П., аспірант

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

FOG COMPUTING ЯК ПРОМІЖНИЙ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ШАР МІЖ ІОТ ТА CLOUD

Попеляєв Д.П. Fog computing як проміжний обчислювальний шар між IoT та Cloud. У роботі представлено виклад положення туманних обчислень в середовищі IoT та Cloud computing. Показані мотиваційні причини для створення та впровадження Fog computing в якості проміжного обчислювального шару, зроблено високорівневий опис внутрішньої структури та організації туманного шару, показані передумови для формування крайових обчислень, а саме функціональні компоненти IoT та їх розподіл по фізичних обчислювальних шарах; а також системні характеристики IoT, що вимагають додаткового обчислювального шару. Таким чином, для надання необхідних сервісів і досягнення необхідної масштабованості, рівень туману має модульну організацію та розподіляється географічно, а його інтерфейси налаштовані на спілкування в гетерогенному середовищі з різнорідними протоколами бездротових мережевих платформ та архітектурами сенсорного шару IoT.

Ключові слова. Туманні обчислення, крайові обчислення, інтернет речей, хмарні обчислення, проміжне програмне забезпечення, шар сприйняття, розподілені обчислення, різнорідні протоколи.

Попеляев Д. П. Fog computing как промежуточный вычислительный шар между IoT и Cloud. Аннотация. В работе представлены изложение положения туманных вычислений в среде ИВТ и Cloud computing. Показаны мотивационные причины для создания и внедрения Fog computing в качестве промежуточного вычислительного слоя, сделано высокоуровневое описание внутренней структуры и организации туманного слоя, показаны предпосылки для формирования краевых вычислений, а именно функциональные компоненты IoT и их распределение по физическим вычислительным слоям а также системные характеристики IoT, требующие дополнительного вычислительного слоя. Стало быть, для предоставления необходимых сервисов и достижения необходимой масштабируемости, уровень тумана имеет модульную организацию и распределяется географически, а его интерфейсы настроены на общение в гетерогенной среде с разнородными протоколами беспроводных сетевых платформ и архитектурами сенсорного слоя IoT.

Ключевые слова. Туманные вычисления, краевые вычисления, интернет вещей, облачные вычисления, промежуточное программное обеспечение, слой восприятия, распределения вычисления, разнородные протоколы.

Popeliaiev D. P. Fog computing as an intermediate computing layer between IoT and Cloud. Annotation. The paper describes the provisions of the fog computing in the IOT and Cloud computing environment. The motivational reasons are shown for the creation and implementation of Fog computing as an intermediate computing layer; a high-level description of the internal structure and organization of a fog layer is made; the prerequisites for the formation of boundary calculations are shown; namely, the functional components of the IoT and their distribution on the physical computational layers; as well as IoT system specifications requiring an additional computing layer. Thus, to provide the necessary services and achieve the necessary scalability, the level of fog has a modular organization and is distributed geographically, and its interfaces are configured to communicate in a heterogeneous environment with various protocols of wireless networks, platforms and architectures of the IoT sensor layer.

Key word. Fog computing, edge computing, Internet of Things, Cloud computing, middleware, perception layer, distributed computing, heterogeneous protocols.

Вступ. Удосконалення науки та технологій дозволило виробляти менші, дешевші й продуктивніші обчислювальні пристрої, здатні відстежувати навколишнє середовище, спілкуватися та керуватися віддалено, що призвело до підвищення зацікавленості у застосуванні Internet of Things до великої кількості аспектів життя, таких як розумні міста, охорона здоров'я та розумний дім. Інтернет речей (IoT) - це самоконфігурована та адаптовна мережа, яка з'єднує реальні речі з Інтернетом, що дозволяє їм спілкуватися з іншими пов'язаними об'єктами, реалізуючи новий спектр розподілених сервісів [1]. Це визначення IoT не є всеосяжним, існує багато визначень, які відрізняються у деталях. IoT вже оточує нас, підключаючи wearable-пристрої (смарт-годинники, фітнес-трекери), смарт-автомобілі та інтелектуальні системи дому. Очікується, що до 2020 року до Інтернету буде підключено понад 50 мільярдів пристроїв [2].

Проблема полягає в тому, що впровадження такої величезної кількості підключених пристроїв вимагає масштабованої архітектури для їх підключення без погіршення якості сервісу, що вимагається додатками. Крім того, більшість пристроїв, що формують Інтернет речей, є обмеженими у ресурсах; такі ресурси як обчислювальна потужність, енергія, пропускна здатність та об'єм пам'яті, є дефіцитними. Ці обмеження накладають умови на можливі сценарії розгортання додатків, що використовують такі IoT пристрої. Наприклад, неможливо використовувати датчик, що працює від батареї, для безпосереднього підключення до Інтернету та передавання зібраної з оточення інформації протягом тривалого часу або тривалого зберігання логованих даних у локальній пам'яті. Ці обмеження мають конструктивний вплив, який

видозмінює архітектуру IoT багатьма способами. Вплив цих обмежень, потребує відповідних заходів по їх пом'якшенню [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що багато з обмежень архітектури IoT можна пом'якшити, або ж навіть повністю зняти, розширюючи функції Cloud computing ближче до пристроїв IoT, або ж навіть повністю перекладаючи частину з них [3]. Fog computing (туманні обчислення) [4], термін також відомий як крайові обчислення, є таким проміжним шаром, який розширює функції Cloud.

Туманні обчислення можуть служити мостом між розумними пристроями, розподіленими хмарними обчисленнями та службами зберігання даних. Через близькість до кінцевих користувачів у порівнянні з хмарними даними-центрами, туманні обчислення можуть запропонувати сервіси зі значно кращими показниками затримки [3]. Також слід підкреслити, що зазвичай існує значна різниця у масштабі між Fog і Cloud computing. Порівняно з туманом, Cloud має масивні обчислювальні та комунікаційні можливості, а також простори для зберігання даних [4].

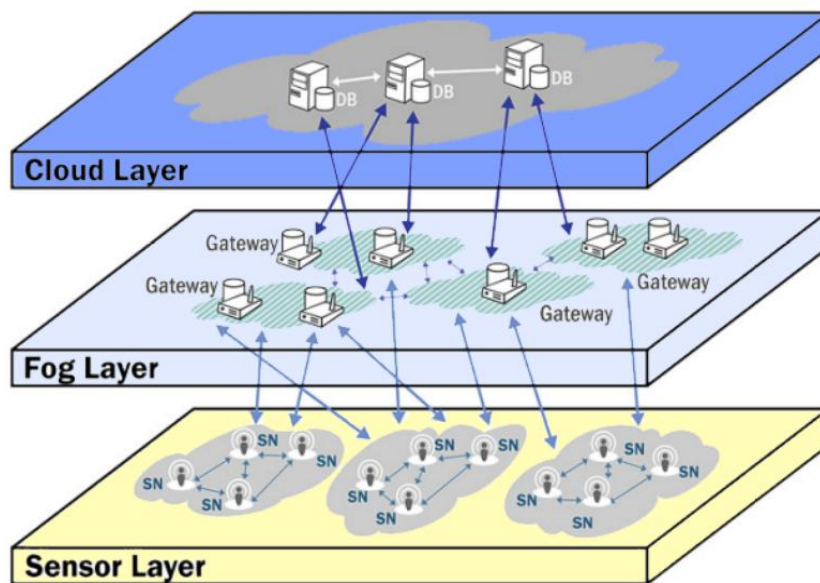


Рис. 1 IoT із залученням шару туманних обчислень [5]

На рисунку 1 показано роль, яку відіграють хмарні дата-центри та крайові обчислення (або як їх називають cloudlets) для надання сервісу IoT кінцевим користувачам. Оператори мобільних мереж є потенційними постачальниками туманних шлюзів, оскільки вони можуть пропонувати такий сервіс як одну з моделей IaaS, PaaS або SaaS для корпоративного бізнесу, надаючи послуги в їх мережі обслуговування [6]. Туманні обчислення стають оптимальним вибором для проектувальників IoT по наступним причинам:

- Розташування: туманна інфраструктура розташована між смарт об'єктами та хмарними даними-центрами; таким чином, забезпечуючи кращі показники затримки.

- Розповсюдження: в порівнянні з хмарою, ноди, на яких базується інфраструктура туманних обчислень, мають обмежені можливості зберігання, обробки та комунікації. Але таких нод, зазвичай, розгортається велика кількість, оскільки їх вартість, як правило, невелика, порівняно з хмарними даними-центрами.

- Масштабованість: Туман дозволяє IoT-системам бути більш масштабованими; так, збільшуючи кількість кінцевих користувачів, кількість розгорнутих нод може збільшуватися, щоб впоратися з зростаючим навантаженням. Якщо досягти такого розширення за рахунок хмари, а саме розгортанням нових центрів обробки даних, то це буде досягтися значно більшими витратами коштів [3].

- Підтримка мобільності: Туманна інфраструктура надає сервіси, що функціонують як мобільна хмара, оскільки вона розташована поруч із кінцевими користувачами. Таким чином, туман може забезпечити кращу продуктивність інтерактивних сервісів у реальному часі.

- Аналітика "на льоту": Ресурси туману можуть виконувати агрегацію для відправки не сирих, а частково оброблених даних до хмарних дата-центрів для подальшої обробки.

Набір можливих сервісів, які потенційно можуть бути інтегровані на рівні туманної інфраструктури, є величезним. Деякі з сервісів є масштабованою версією тих, що надаються хмарними обчисленнями, але більшість з них з'явилися останнім часом як відповідь на зростаючі потреби IoT.

Таким чином, **цілю статті** є дослідження питання, як туманні обчислення можуть підвищити загальну продуктивності застосунків IoT, беручи на себе частину хмарних сервісів високого рівня, виконуючи аналітику та зберігання даних на базі локальних ресурсів; а також визначення факторів, якими була мотивована поява явища Fog computing.

Поява Fog Computing. Архітектура IoT являється активною областю сучасних досліджень. Архітектура відіграє вирішальну роль в успіху створеної системи. Існує деяка кількість спроб від державних проєктів, промислових асоціацій та академічних інститутів створити універсальну робочу архітектуру IoT [7]. Більшість пропозицій щодо архітектури є загальними моделями IoT, що не залежать від конкретної області застосування або реалізації. Найвідоміший проєкт "Архітектура Інтернет-речей" (IoT-A) [8] містить узагальнення моделі домену IoT, що служить основою для еталонної архітектури. З функціональної точки зору, модель IoT-A визначає наступні компоненти системи IoT, як основні елементи: комунікація, безпека, керування та сервіс.

Згідно іншого варіанту визначення компонентів системи на функціональному рівні, дослідниками описується IoT як інтеграція компонентів ідентифікації, відстеження, зв'язку, обчислень, сервісу та семантики [3]. Дані компонентні класифікації IoT базуються на функціональних можливостях кожної одиниці. Деякі з функціональних одиниць можуть бути розташовані в одному фізичному пристрої. Проте система IoT є розподіленою системою. Визначені вище компоненти є географічно розподіленими, а за їх сумісну комунікацію та підключення відповідає компонент зв'язку.

У найпростішому випадку можуть бути логічно утворені дві групи компонент: перша група містить ідентифікацію та відстеження, а друга - обчислення, сервіс та семантику (аналогічний поділ можна зробити і у моделі IoT-A). Прагнучи знайти найкращий рівень функціональної класифікації та фізичного відокремлення, дослідники запропонували різні альтернативи.

Найпростіший спосіб зробити пристрій IoT видимим через Інтернет - забезпечити йому доступ до хмарного серверу, таким чином, щоб він міг завантажувати дані, отримувати сповіщення або команди. У такій конфігурації клієнт відповідає за читанням даних із середовища, коли як більшості інших функцій працюють у Cloud. Цей традиційний клієнт-серверний підхід до організації компонентів IoT все ще використовується багатьма вендорами. Існують також альтернативні варіанти цієї архітектури, де логічні компоненти системи розділяються на три або п'ять шарів [3]. Це розділення по рівням в основному залежать від функціональності модулів.

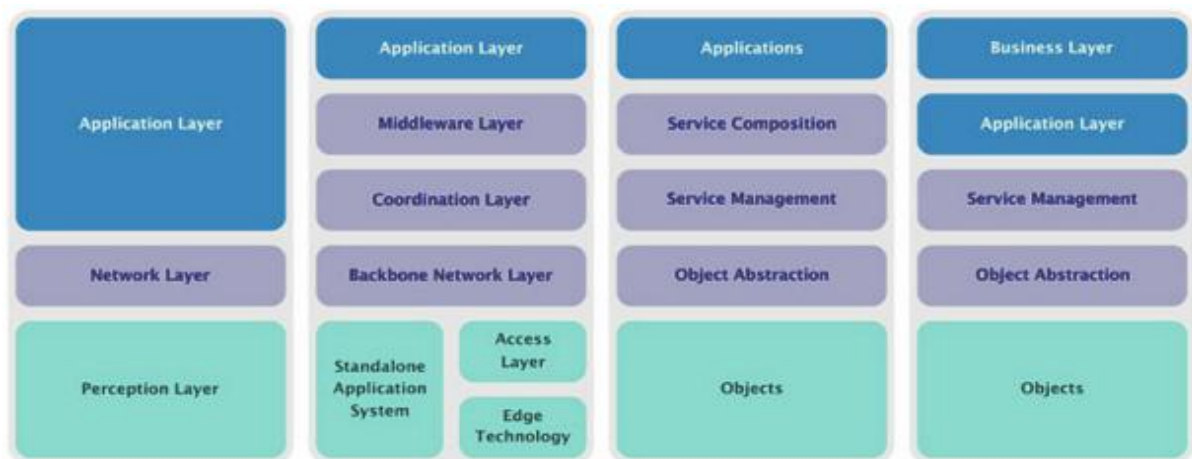


Рис. 2 Варіанти архітектури IoT [3]

Розглянемо тришарову архітектуру. У цьому варіанті архітектури, датчики знаходяться у нижньому шарі - шарі сприйняття (perception layer). Мережевий рівень (network layer), розташований наступним після сприйняття, з'єднує датчики з шаром застосунків (application layer). За такого поділу кожен шар має свою відокремлену функціональність. Датчики та виконавчі пристрої на рівні сприйняття збирають дані, які транспортуються через мережу, зрештою

досягаючи логіки конкретного застосунку в application layer. На рис. 2 показані різні типи логічного поділу компонентів IoT. Деякі з альтернативних варіантів розділяють архітектуру на п'ять рівнів, відокремлюючи додаткові проміжні шари, такі як middleware та object abstraction. Відповідно, ці додаткові шари допомагають надавати послуги інтеграції та інкапсулюють пристрої на рівні сприйняття, приближаючись до ідеї необхідності рівня туманних обчислень. Незважаючи на те, що наявність цих логічно відокремлених шарів забезпечує модульність та легкість реалізації, це не відповідає вимогам рівня сприйняття, таким як необхідність у низькій затримці зв'язку та мобільності.

Рівень сприйняття або сенсорний шар, показаний на рис. 1, може складатися з мільйонів пристроїв. Більшість з цих пристроїв малі за розміром, живляться від батареї, мають невелику пам'ять та обмежені в обчислювальній потужності. Такі ресурсні обмеження вимагають нових архітектурних підходів. Крім того, для мережевої взаємодії між пристроями широко використовуються різноманітні протоколи бездротового зв'язку такі як Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, NFC, ZigBee, RFID та 6LoWPAN [14]. Крім вищезгаданих можливих варіантів мережевих протоколів, існують відмінності в протоколах прикладного рівня. Різні протоколи прикладного рівня можуть бути навіть серед пристроїв, що використовують один і той же базовий мережевий протокол. Наприклад, CoAP [9], MQTT [10], DDS [11] та XMPP [12] є часто використовуваними. Крім того, існує кілька специфічних форматів даних, в залежності від області застосування, які використовуються цими протоколами [5].

Таким чином, згадані вище чинники, а саме обмеженість у ресурсах, неоднорідність протоколів, платформ та форматів даних вимагають проектування більш ефективної та зручної IoT архітектури.

Процес проектування архітектури для конкретної системи залежить від атрибутів застосунку, що розробляється. Після логічного розділення функціональних компонентів на три-п'ять шарів, ми можемо відобразити логічні компоненти на фізичні обчислювальні шари. Як згадувалося раніше, в підході клієнт-сервер, більшість компонентів (показано на рис. 2) працюватимуть на сервері, розташованому в хмарі. Але цей підхід не відповідає всім вимогам, обговореним вище. Це ініціювало дослідження альтернативної ієрархії обчислень, яка б працювала для IoT кращим чином.

Туманні обчислення вводяться як проміжний шар між рівнем сприйняття та Cloud, що забезпечує більшу гнучкість розгортання компонентів системи IoT. На рис. 1 показане розположення туманного обчислювального шару між шаром сприйняття або датчиками та Cloud layer. Дано більш детальну інформацію про внутрішню організацію та сервіси, притаманні цьому рівню.

Характеристики Fog computing. Так як туман є проміжним обчислювальним шаром, його характеристики розглядається в порівнянні з хмарним та шаром сприйняття. На відміну від хмарного шару, крайові обчислення ближчі до рівня сприйняття, і ця близькість надає ряд переваг, які характеризують шар. Однією з найочевидніших переваг над Cloud є зручне місцезнаходження туманного шару в плані місцевого керування. Ця перевага витікає з фізичного географічного розподілу пристроїв, що формують туманний шар [6]. Як показано на рисунку 1, кожен шлюз в шарі туману керує підмножиною вузлів у сенсорному шарі. Це підмножина обмежених у ресурсах пристроїв, які розташовані близько один до одного, і керуючий шлюз може легко знайти кожен пристрій. Проінформованість туманного шару щодо розташування пристроїв може бути використана для вирішення кількох функціональних та нефункціональних вимог архітектури IoT, таких як мобільність та безпека. Ще однією тісно пов'язаною характеристикою туманного шару є його широкомасштабний розподіл, на відміну від централізованого хмарного шару. Централізація в цьому контексті є відносною; хмарний шар є централізованим з точки зору клієнта. Дивлячись на організацію серверів у хмарі, вони є географічно розподіленими, але на відміну від туманного шару, розподіл є незалежним від шару сприйняття. Наприклад, постачальники хмарних сервісів, такі як Amazon, мають кілька центрів обробки даних у різних регіонах. В свою чергу, географічний розподіл в туманному шарі відрізняється невеликими відстанями між шлюзами та їх розповсюдженням.

Комбінація таких переваг як проінформованість туманного шару щодо розташування пристроїв та широкомасштабний географічний розподіл, задовольняють вимоги мобільності пристроїв на рівні сприйняття. Більше того, близькість туману до кінцевих вузлів забезпечує взаємодію в режимі реального часу з датчиками та виконавчими елементами в сенсорному шарі.

Таким чином, ключовою особливістю туманного шару є географічний розподіл, що надає можливість комунікації з мінімальною затримкою. Деякі домени додатків IoT, такі як охорона здоров'я або автомобілебудування, дуже залежать від такої функції [13].

У сфері IoT переважають бездротові мережі. Існує велика кількість бездротових протоколів, призначених для роботи на низькому споживанні енергії та низькій пропускну здатності. Наприклад, деякі з цих протоколів: 6LoWPAN, BLE, NarrowBand IoT (NB-IoT) [15], LoRa [16] та Sigfox [17]. Більшість цих протоколів з'єднують сенсорні вузли з рівнем туману, щоб отримати доступ до хмарних сервісів. Ці протоколи зазвичай несумісні один з одним. Для того, щоб впоратися з цією проблемою, шар туману забезпечує додатковий сервіс, виступаючи в ролі інтерпретатора у гетерогенному середовищі з набором несумісних мережевих протоколів [18].

Шлюзи в шарі туману також можуть виконувати легку аналітику в межах мережі, щоб надавати дані, команди та сповіщення кінцевим користувачам, а також вузлам датчиків у режимі реального часу. Крім того, внутрішня інфраструктура самого туману може бути організована федеративно або ієрархічно, базуючись на функціонуванні застосунку або розташуванні підключених пристроїв.

Організація Fog computing. Виходячи з характеристик шару туману і можливого набору сервісів, може бути організована ефективна проміжна інфраструктура для задоволення потреб IoT. Така інфраструктура складається з мережевих шлюзів або бездротових точок доступу, що обслуговують клієнтів у певній області. Роль такого шлюзу полягає в тому, щоб передавати мережеві пакети до back-end інфраструктури, яка підключена до Інтернету. З огляду на величезну кількість IoT пристроїв, що підключаються до шару Fog, цей шар можна візуалізувати як мережу шлюзів, що покривають деяку область. Крім простого передавання мережевих пакетів, ці мережеві інтелектуальні шлюзи можуть обробляти дані або зберігати їх, коли це необхідно [13]. Рис. 1 показує шар туману, де розподілені інтелектуальні шлюзи зв'язуються з Cloud, сенсорним шаром та між собою. Критичним компонентом у туманних шлюзах являється мережевий інтерфейс, який дозволяє підтримувати гетерогенні протоколи бездротової мережі, показані раніше.

Висновки. У цій роботі представлено стислий виклад положення туманних обчислень в середовищі IoT та Cloud. Були показані мотиваційні причини для створення та впровадження Fog computing в якості проміжного обчислювального шару. Крім того, було зроблено високорівневий опис внутрішньої структури та організації туманного шару. Були показані передумови для формування туманних обчислень, а саме функціональні компоненти IoT та їх розподіл по фізичних обчислювальних шарах; а також системні характеристики IoT, такі як необхідність мобільності та ресурсні обмеження рівня сприйняття, що вимагають додаткового обчислювального шару. Функціями цього шару стало забезпечення зберігання даних, а також підключення та обробки датчиків та виконавчих пристроїв. Для досягнення цих функцій і необхідної масштабованості, рівень туману має модульну організацію та розподіляється географічно. Гетерогенна природа бездротових мережевих протоколів, платформ та архітектур сенсорного шару IoT ускладнює створення інтегрованої та надійної системи. Рівень туману забезпечує сервіси, які можуть бути використані для приховання такої неоднорідності та забезпечення єдиного каналу доступу до шару сприйняття користувачами через мережу Інтернет. **Подальша робота у даному напрямку** буде спрямована на дослідження можливостей, а також обмежень сервісів, що надаються туманним шаром інфраструктури IoT.

1. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a definition of the Internet of Things (IoT) //IEEE Internet Initiative. – 2015. – Т. 1. – С. 1-86.
2. Ray S., Jin Y., Raychowdhury A. The changing computing paradigm with internet of things: A tutorial introduction //IEEE Design & Test. – 2016. – Т. 33. – №. 2. – С. 76-96.
3. Al-Fuqaha A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Т. 17. – №. 4. – С. 2347-2376.
4. Bonomi F. et al. Fog computing and its role in the internet of things //Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. – ACM, 2012. – С. 13-16.
5. Rahmani A. M. et al. (ed.). Fog Computing in the Internet of Things: Intelligence at the Edge. – Springer, 2017.
6. Verma D. C., Verma P. Techniques for surviving the mobile data explosion. – John Wiley & Sons, 2014.
7. Krco S., Pokric B., Carrez F. Designing IoT architecture (s): A European perspective //Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on. – IEEE, 2014. – С. 79-84.
8. Bauer M. et al. Deliverable D1. 5—Final architectural reference model for the IoT v3. 0. – 2013.
9. Shelby Z., Hartke K., Bormann C. The constrained application protocol (CoAP). – 2014. – №. RFC 7252.
10. OASIS M. version 3.1. 1 oasis standard. – 2014. – URL: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.pdf>

11. Pardo-Castellote G. Omg data-distribution service: Architectural overview //Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on. – IEEE, 2003. – С. 200-206. – URL: <http://www.omg.org/spec/DDS/1.4/>
12. Saint-Andre P. Extensible messaging and presence protocol (XMPP): Core. – 2011. – №. RFC 6120. – URL: <https://xmpp.org/extensions/index.html>
13. Gia T. N. et al. Fog computing in healthcare internet of things: A case study on ecg feature extraction //Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM), 2015 IEEE International Conference on. – IEEE, 2015. – С. 356-363.
14. Kushalnagar N., Montenegro G., Schumacher C. IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): overview, assumptions, problem statement, and goals. – 2007. – №. RFC 4919. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc4919>
15. Wang Y. P. E. et al. A primer on 3GPP narrowband internet of things //IEEE Communications Magazine. – 2017. – Т. 55. – №. 3. – С. 117-123.
16. Alliance L. R. Wide area networks for IoT //Recuperado el. – 2016. – Т. 23. – URL: <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>
17. Sigfox, About sigfox. – URL: <http://www.sigfox.com/>
18. Negash B. et al. LISA 2.0: lightweight internet of things service bus architecture using node centric networking //Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2016. – Т. 7. – №. 3. – С. 305-319.