

ТАБОР Денис

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
<https://orcid.org/0009-0002-6813-2125>

МЕТОДИКА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У БАГАТОДІАПАЗОННИХ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ПРІОРИТЕТИЗАЦІЄЮ ТРАФІКУ

У статті запропоновано теоретичну методику покращення розподілу ресурсів у сучасних бездротових мережах. Основу підходу складає алгоритм, який визначає пріоритетність передачі даних для кожного користувача, ґрунтуючись на двох ключових факторах: терміновості даних (часу, що залишився до дедлайну) та якості радіоканалу.

Методика описує механізм динамічного вибору розміру блоків даних для передачі, що дозволяє ефективніше використовувати доступний радіоспектр і зменшити кількість прострочених або втрачених даних. Окремо розглядається підхід до роботи з пристроями, які можуть одночасно працювати в кількох діапазонах, з метою уникнення їхнього перевантаження.

Ключові слова: бездротові мережі, алгоритм розподілу ресурсів, якість обслуговування, радіоканал, багатолінкова передача.

TABOR Denis

State University of Information and Communication Technology

RESOURCE ALLOCATION IN MULTI-BAND WIRELESS NETWORKS WITH TRAFFIC PRIORITIZATION

The article investigates the technical capabilities and features of the new generation of wireless networks—the Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) standard, known as Extremely High Throughput (EHT). Primary attention is given to the implementation of the key technology Multi-Link Operation (MLO), which aims to provide a maximum throughput of up to 46 Gbit/s and significantly reduce latency. MLO technology allows stations (STA) and access points (AP) to simultaneously use multiple channels across different frequency bands (2.4, 5, and 6 GHz) for data transmission and reception. This is achieved through the simultaneous use of different channels, load distribution, and adaptive switching between frequencies, which enhances connection reliability.

Different operating modes of Multi-Link Devices (MLD), classified by the number of radio interfaces and transmission type, are considered. Devices with a single radio interface are highlighted: MLSR (Multi-Link Single-Radio) and its enhanced version EMLSR (Enhanced Multi-Link Single-Radio). MLSR uses a single radio module to monitor multiple channels, but transmission occurs on one channel at a time. EMLSR manages channel switching more efficiently and can dynamically manage configurations (Nss, MCS, BW) for each channel, reducing latency. For devices with multiple radio interfaces (MLMR), the asynchronous mode STR-MLMR (Simultaneous Transmit and Receive Operation) and the synchronous mode NSTR-MLMR (Nonsimultaneous Transmit and Receive Operation) are investigated. STR-MLMR, having two or more radio modules, ensures simultaneous reception and transmission on different channels, which significantly increases throughput and is suitable for intensive traffic. NSTR-MLMR allows only reception or only transmission at any given moment across all channels, which is used to avoid inter-channel interference. The EMLMR (Enhanced Multi-link Multi-Radio) mode is also considered, which is an enhancement of STR-MLMR with the capability for dynamic modification of individual channel parameters and resource allocation.

Keywords: wireless networks, resource allocation algorithm, quality of service, radio channel, multi-link operation.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Розвиток безпроводних систем передачі даних, супроводжується зростанням обсягів трафіку в безпроводній мережі та кількості клієнтів що одночасно використовують спільний радіочастотний простір. Це зумовлює збільшення конкуренції за обмежений радіоресурс і призводить до таких негативних явищ як зниження максимально можливої пропускної здатності, збільшення затримок, нерівномірний розподіл ресурсів між клієнтам, а також порушення якості обслуговування що стає помітним при використанні чутливих до затримок сервісів

Схеми розподілу пропускної здатності що застосовуються в попередніх поколіннях стандарту, можуть виявитись недостатньо ефективними у сценаріях з одночасним використанням декількох частотних діапазонів, як у Wi-Fi 7, оскільки не забезпечують динамічної адаптації та поточний стан каналів. Тому останні дослідження пов'язані з дослідженням багатолінкових системи зосереджуються на розробці алгоритмів здатних вирішувати окремі аспекти даної проблеми.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [1] автори дослідили зниження ефективності MLO, коли кожен додатковий інтерфейс збільшує ймовірність конкуренції з іншими мережами. Для усунення цього ефекту було запропоновано

стратегію у якій кожен новий потік повністю закріплюється за окремим інтерфейсом – тим що має найменше поточне завантаження.

Авторами [2] було виявлено що при нерівномірному навантаженні каналів можливе суттєве збільшення затримки. Та було запропоновано модифікований механізм багатоканальної передачі в якому для кожного пакету одночасно ініціюються незалежні процедури зворотнього відліку на всіх інтерфейсах і передача здійснюється через той інтерфейс де відлік завершується першим, що в результаті оптимізує вибір каналу в реальному часі.

У [3] розглянуто проблему планування пакетів з обмеженими дедлайнами в мережах з використанням OFDMA, де потрібно синхронно виділяти MRU для множини клієнтів в умовах обмеженої пропускної здатності та різних пріоритетів. Запропоновано алгоритм який спочатку за допомогою локального пошуку підбирає оптимальні часові інтервали для синхронної передачі, а потім для кожного інтервалу застосовує зважене парування між пакетами та доступними MRU.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даної роботи є підвищення ефективності багатодіапазонних бездротових мереж шляхом розробки алгоритму розподілу ресурсів, який визначає, яким саме клієнтам, в який момент часу, на якому частотному діапазоні і який обсяг радіоресурсів виділити для передачі їх даних.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Методика вдосконалення розподілу ресурсів у бездротових мережах в запропонованому алгоритмі спирається на підходи теорії черг, яка дозволяє математично описати процес накопичення і обслуговування пакетів даних у середовищі з обмеженими ресурсами [4]. У загальному випадку систему можна уявити як сукупність черг, де кожен користувач ставить у чергу свої пакети, а система обслуговує їх залежно від політики планування. Особливістю сучасних багатодіапазонних мереж є те, що пакети мають різні часові вимоги, тобто дедлайн. Якщо затримка перевищує цей інтервал, пакет втрачає актуальність і не повинен передаватися далі [5].

Цей підхід можливо реалізувати через концепцію залишкового часу до дедлайну, який визначає, наскільки терміновим є конкретний пакет. Формалізувати цю ідею можна введенням коефіцієнта терміновості, який обернено пропорційний залишковому часу життя пакета. Якщо позначити момент дедлайну як DL , а поточний системний час як t , то коефіцієнт має вигляд (1):

$$\lambda = \frac{1}{DL-t} \quad (1)$$

Така залежність гарантує, що зі зменшенням відстані до дедлайну величина λ зростає, а отже потік автоматично отримує вищий пріоритет у процесі розподілу піднесучих. Цей підхід відображає ключову властивість системи з чергами з часообмеженими заявками: для підтримки якості обслуговування необхідно мінімізувати кількість відкиннутих заявок, які втратили актуальність. На практиці це означає, що навіть якщо канал є несприятливим, але дедлайн пакету майже сплинув, система все одно намагатиметься виділити йому ресурс, бо невиконання дедлайну матиме гірший вплив на метрики задоволеності користувача.

Іншим важливим аспектом, що впливає з теорії черг, є баланс між обслуговуванням термінових і нетермінових пакетів. Якщо надавати абсолютний пріоритет лише тим пакетам, що мають найменший залишковий час, то можна отримати ефект затримки передачі для патів з низьким часовим пріоритетом [6]. Для уникнення цього коефіцієнт терміновості використовується не ізольовано, а у складі більш складної функції, що враховує ще й параметри радіоканалу, а саме зведення часової терміновості та придатності каналу в єдине правило прийняття рішень. Спочатку часову складову можна подати як спадну нормовану функцію від залишкового інтервалу до втрати змістовності пакета: коли час спливає, вона різко зростає і що вимагає пришвидшення передачі пакету. Канальна складова, навпаки, відображає потенціал передати більше корисних біт за той самий бюджет піднесучих і має зростати зі збільшенням ефективної швидкості. Формально корисність для пари «клієнт—діапазон» задається як [7] (2):

$$U = \left(\frac{\Theta}{\varepsilon + \Delta T} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{R_{\text{eff}}}{R_{\text{ref}}} \right)^\beta, \quad (2)$$

де ΔT (залишковий час до дедлайну) — час, що залишився до втрати актуальності даних користувача. R_{eff} — розрахункова швидкість передачі з урахуванням обраної модуляційно-кодової схеми (MCS) та поточного рівня перешкод,

Θ — параметр, що забезпечує інваріантність часової складової до абсолютних значень часу,

R_{ref} — середнє значення швидкості передачі, що використовується для нормування канальної складової,

ε — додатна величина, що запобігає розходженню функції корисності при наближенні ΔT до нуля.

α і β - визначає баланс між часовою ефективністю та спектральною ефективністю.

Оцінка ефективної швидкості базується на доступній модуляційно-кодовій схемі та миттєвому фоні завад, причому модель свідомо лишається простою, щоб не втратити керованість у реальному часі. У

найкоротшому вигляді використовується корекція базової швидкості через втрати, спричинені інтерференцією, що віддає пріоритет каналам з високою якістю (3):

$$R_{\text{eff}} = R_0 (1 - \eta), \quad (3)$$

де R_0 відповідає обраній модуляції,

η — нормований рівень перешкод.

Сам розподіл RU (ресурсних одиниць) виконується як послідовність локально-оптимальних кроків за критерієм щільності корисності на одиницю спектрального бюджету. Для кожного можливого RU визначається приріст мети на одиницю розміру, після чого обирається найбільш вигідне призначення з негайним оновленням залишку і повторенням процедури (4):

$$\rho = \frac{\Delta U}{s}, \quad (4)$$

де s — розмір мінімальної RU,

ΔU — приріст корисності з урахуванням того, що часовий інтервал скорочується, а очікувана швидкість у поточному діапазоні змінюється під дією фонових процесів.

Наступний крок є перехід від функції корисності до практичного механізму призначення RU. Тут ключовим фактором стає вибір розміру RU залежно від SNR (відношення рівня корисного сигналу до рівня шуму), оскільки саме ця характеристика визначає ймовірність коректного декодування пакета [8]. Якщо на певному каналі рівень сигналу низький, то використання великих блоків стає невиправданим, адже кожна помилка спричиняє втрату значного обсягу даних. Навпаки, при високому SNR можна безпечно виділяти широкі ресурси, що зменшує відносні накладні витрати та збільшує пропускну здатність. Така залежність може бути описана у вигляді простої умови порогового типу, де для низьких значень SNR застосовуються лише блоки розміром до певної межі, тоді як при високих значеннях відсікаються надто дрібні блоки, що економить спектральний ресурс.

Формально це можна представити через правило вибору (5):

$$s \in S(\text{SNR}) \Rightarrow \begin{cases} s \leq s_{\max}, & \text{SNR} < \gamma_1, \\ s \geq s_{\min}, & \text{SNR} > \gamma_2, \\ \text{будь-яке } s, & \gamma_1 \leq \text{SNR} \leq \gamma_2, \end{cases} \quad (5)$$

де γ_1 та γ_2 є пороговими значеннями співвідношення сигнал/шум,

$s_{\min}, s_{\max}$ — межі розмірів блоків.

Таким чином формується динамічна множина допустимих RU, яка для кожного клієнта та кожного діапазону визначається миттєвим станом каналу. Це рішення інтегрується безпосередньо у процес розподілу, адже для обчислення приросту корисності враховуються лише ті блоки, що задовольняють умові каналної надійності. Такий підхід дозволяє уникати призначення неефективних або ненадійних блоків і водночас зберігати різноманітність вибору у випадках середніх значень SNR.

Додатково у цій моделі можна розглядати ймовірність коректної передачі як експоненційну функцію від SNR і розміру RU. Тоді ефективна швидкість для блоку розміру s може бути записана як (6):

$$R_{\text{eff}}(s) = R_0(s) \exp\left(-\frac{ks}{\text{SNR}}\right), \quad (6)$$

де $R_0(s)$ — номінальна швидкість для даного розміру, а коефіцієнт k відображає чутливість системи до завад. У такий спосіб алгоритм одержує плавну адаптацію: при зростанні шуму або збільшенні блоку швидкість зменшується експоненційно, що автоматично стимулює вибір компактніших ресурсів у несприятливих умовах.

Після завершення процедури призначення RU на рівні окремих діапазонів система переходить до обчислення сумарної швидкості, що фактично отримує кожен клієнт. Для цього усі виділені йому блоки агрегуються, і їх ефективна пропускну здатність підсумовується з урахуванням умов передачі. Таким чином, результат розподілу подається у вигляді інтегральної швидкості, що характеризує реальний обсяг даних, який може бути переданий у рамках заданого інтервалу. Якщо клієнт має підтримку кількох діапазонів, то у підрахунку беруться всі активні канали, що створює перевагу для багатолінійних пристроїв і відображає їхню здатність паралельно використовувати кілька частотних ресурсів.

Формально сумарна швидкість для користувача визначається як (7):

$$R_{\text{tot}} = \sum_{c \in \mathcal{B}} R_{\text{eff}}^{(c)}, \quad (7)$$

де $R_{\text{eff}}^{(c)}$ — ефективна швидкість у діапазоні c , а $\mathcal{B}$ — множина діапазонів, доступних для даного пристрою. Саме ця величина далі використовується для оцінки рівня задоволення користувача. Оскільки різні класи сервісу мають відмінні мінімальні вимоги, алгоритм застосовує диференційовані пороги: для потоків голосу швидкість, достатня для задоволення, може становити лише кілька мегабіт за секунду, тоді як для відео поріг у кілька разів вищий, а для потоків найнижчих класів достатньо будь-якого ненульового результату. У такий спосіб зберігається сумісність з існуючою ієрархією якості обслуговування, але в адаптивній формі, що враховує як терміновість трафіку, так і фізичні умови передачі.

Функція задоволеності вводиться у вигляді індикатора (8):

$$S = \begin{cases} 1, & R_{tot} \geq R_{th}, \\ 0, & R_{tot} < R_{th}, \end{cases} \quad (8)$$

де R_{th} — порогове значення для відповідного класу сервісу.

Таким чином, для кожного клієнта результат алгоритму має дві складові: набір призначених RU і бінарну оцінку задоволення. Це дозволяє інтерпретувати поведінку системи, підраховуючи кількість користувачів, що досягли необхідної якості, а також тих, чийі вимоги залишилися незадоволеними.

Завершальним елементом алгоритму є оцінка того, наскільки ефективно використані ресурси спектра та наскільки збалансовано розподілене навантаження між доступними діапазонами. Для кожного діапазону обчислюється коефіцієнт використання, який показує, яка частка доступних піднесучих була реально задіяна в передачі. Нехай T_{used} позначає кількість піднесучих, що були призначені користувачам, а T_{tot} — їх загальну кількість у діапазоні. Тоді коефіцієнт використання визначається як (9):

$$\mu = \frac{T_{used}}{T_{tot}}, \quad (9)$$

Цей показник дозволяє відстежувати ступінь заповнення спектра і робити висновки про його баланс: якщо у різних діапазонах значення μ сильно відрізняються, це свідчить про перекоси у плануванні, які потенційно можна оптимізувати. Навпаки, близькі значення означають, що навантаження рівномірно розподілене, і мережа функціонує стабільно.

Крім простого підрахунку використаних піднесучих, алгоритм враховує також якість їх застосування. Для цього вводиться поняття ефективної пропускної здатності діапазону, що визначається як сума реальних швидкостей усіх користувачів у цьому діапазоні, поділена на його смугу пропускання. Якщо позначити ефективні швидкості користувачів як $R_{eff}^{(i)}$, а смугу каналу як B , то середня спектральна ефективність визначається як (10):

$$\eta = \frac{\sum_i R_{eff}^{(i)}}{B}, \quad (10)$$

Така величина дозволяє оцінювати, наскільки повно реалізується потенціал каналу, визначений теоретичною межею ємності. Вона також слугує критерієм для порівняння роботи алгоритму у різних сценаріях, наприклад, при збільшенні кількості користувачів чи при високому рівні інтерференції.

Особливий інтерес у рамках запропонованого алгоритму становлять багатолінійні пристрої з підтримкою одночасної роботи в декількох діапазонах, наприклад STR, здатних паралельно працювати у кількох каналах. Для узгодження використання спектру між діапазонами лежить припущення, що ефективність STR-клієнта має оцінюватися не лише сумою швидкостей у кожному каналі, а й з урахуванням можливих втрат від одночасних інтерференційних процесів. Якщо у різних діапазонах присутні схожі рівні перешкод, то корисно збільшувати використання обох каналів, проте у випадку, коли один з каналів виявляється перевантаженим або сильно зашумленим, призначення йому додаткових ресурсів не призведе до зростання сумарної швидкості, а лише створить затримки у плануванні. Тому для кожного STR-пристрою вводиться критерій узгодженості, що зважає на виграш від додаткового каналу відносно втрат у стабільності. Формально це виражається через функцію (11):

$$G = \sum_{c \in \mathcal{B}_{STR}} R_{eff}^{(c)} - \delta \cdot \Phi, \quad (11)$$

де $\mathcal{B}_{STR}$ — множина каналів, доступних одночасно,

Φ — індикатор наявності конфлікту чи перевантаження,

δ — коефіцієнт штрафу.

Якщо додатковий канал лише погіршує ситуацію, величина G знижується, і алгоритм відмовляється від його активного використання.

Таке рішення відображає баланс між бажанням максимально реалізувати потенціал багатолінійних пристроїв та необхідністю уникати колективної деградації. У практичному сенсі це означає, що STR-пристрої не завжди отримують усі канали одночасно, а лише тоді, коли це справді приносить додаткову користь.

На основі представлених теоретичних принципів розроблено багатоетапний алгоритм динамічного розподілу ресурсів. Його логіка реалізує безперервний цикл прийняття рішень, де кожен етап відповідає за конкретний аспект оптимізації: від класифікації терміновості трафіку до фінальної перевірки якості обслуговування. Спрощену версію даного алгоритму можна представити у псевдокоді

```
for t in T:
    for u in U:
        calc_weights(u, channels)
    for c in C:
        update_metrics(c)
    allocation = knapsack(C, U, constraints)
    for (u, c) in allocation:
        assign_channel(u, c)
    sync_links(U, mode="EOASYNC")
```

```
optimize_txop(U, allocation)  
handle_delays(U, allocation)  
update_state(U, C)  
log_results(t, allocation)
```

Для коректної оцінки роботи алгоритму на рівні всієї системи можна використати метрики, які узагальнюють результати призначення ресурсів для багатьох клієнтів і діапазонів одночасно.

1) Середня задоволеність, яка показує, яка частка користувачів у системі отримала якість обслуговування не нижчу за встановлений поріг. Якщо позначити індикатор задоволення для користувача i як S_i , то середня задоволеність визначається як (12):

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i, \quad (12)$$

де N — загальна кількість користувачів. Цей показник має інтерпретацію ймовірності того, що випадковий користувач у системі залишився задоволеним.

2) Сумарна пропускна здатність, яка визначає обсяг даних, реально переданих мережею протягом одиниці часу (13):

$$R_{sum} = \sum_{i=1}^N R_{tot}^{(i)}, \quad (13)$$

де $R_{tot}^{(i)}$ — підсумкова швидкість, досягнута користувачем i . Порівняння цього показника для різних сценаріїв навантаження дозволяє виявляти режими, у яких алгоритм досягає максимальної ефективності, і ті, де з'являються обмеження.

3) Ймовірність відмови, яка показує, яка частка користувачів залишилася незадоволеною. Вона є доповненням до середньої задоволеності та може бути записана як (14):

$$P_{fail} = 1 - \bar{S}. \quad (14)$$

Якщо ймовірність відмови у високопріоритетних класах близька до нуля, можна стверджувати, що алгоритм гарантує стабільність роботи мережі навіть за високого навантаження.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Запропонований алгоритм розподілу ресурсів у багатодіапазонних бездротових мережах реалізує призначення радіоресурсів з урахуванням часових характеристик трафіку, стану каналів та пріоритетності потоків даних. Методика дозволяє визначати, яким клієнтам, в який момент часу та на якому частотному діапазоні виділяти ресурси для передачі даних, що забезпечує більш оптимальне використання спектральних ресурсів і підвищує ефективність роботи мережі в умовах змінного навантаження.

Особливістю запропонованого підходу є інтеграція багатодіапазонних можливостей клієнтських пристроїв, що дозволяє ефективно координувати передачу даних на декількох каналах одночасно та зменшувати внутрішні конфлікти при використанні спільних ресурсів. Методика формалізує критерії прийняття рішень щодо розподілу ресурсів, забезпечуючи баланс між пріоритетами різних потоків і доступністю каналу, що є важливим для підвищення загальної ефективності мережі.

Таким чином, представлена методика розподілу ресурсів у багатодіапазонних бездротових мережах із пріоритетизацією потоків дозволяє адаптувати її до використання у різних сценаріях, забезпечуючи координацію виділення частотних діапазонів та обсягу радіоресурсів для клієнтів відповідно до пріоритетів трафіку, що робить її перспективним інструментом для подальшого розвитку стандартів бездротового доступу.

References

1. Zhang L., Yin H., Roy S., Cao L., Gao X., Sathya V. IEEE 802.11be Network Throughput Optimization with Multi-Link Operation and AP Coordination [Електронний ресурс] // arXiv.org. – 2023. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2312.00345v2> (дата обращения: 21.10.2024). – arXiv:2312.00345v2. – DOI: 10.48550/arXiv.2312.00345.
2. Carrascosa M., Geraci G., Knightly E., Bellalta B. An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation // 2022 IEEE International Conference on Communications (ICC). – Seoul, Korea, 2022. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838765.
3. Jain M., Mishra A., Das S., Wiese A., Bhattacharya A., Maity M. A Deadline-Aware Scheduler for Smart Factory using WiFi 6 // Proceedings of the 25th ACM International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing. – New York, NY, USA: ACM, 2024. – P. 1–10. – DOI: 10.1145/3641512.3686387.
4. Mao Z., Koksai C. E., Shroff N. B. Optimal Online Scheduling With Arbitrary Hard Deadlines in Multihop Communication Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2016. – Vol. 24, no. 1. – P. 177–189. – DOI: 10.1109/TNET.2014.2363136.
5. Wang M., Liu J., Chen W., Ephremides A. Joint Queue-Aware and Channel-Aware Delay Optimal Scheduling of Arbitrarily Bursty Traffic Over Multi-State Time-Varying Channels // IEEE Transactions on Communications. – 2019. – Vol. 67, no. 1. – P. 503–517. – DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2875119.
6. Madi N. K. M., Hanapi Z. M., Othman M., Subramaniam S. K. Delay-based and QoS-aware packet scheduling for RT and NRT multimedia services in LTE downlink systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2018. – Vol. 2018. – Art. no. 180. – DOI: 10.1186/s13638-018-1193-3.
7. Kim Y., Kim G., Oh Y., Choi W. Transmission Delay-Based Uplink Multi-User Scheduling in IEEE 802.11ax Networks // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, no. 19. – Art. no. 9196. – DOI: 10.3390/app11199196.
8. Tutelian S., Bankov D., Shmelkin D., Khorov E. IEEE 802.11ax OFDMA Resource Allocation with Frequency-Selective Fading // Sensors. – 2021. – Vol. 21, no. 18. – Art. no. 6099. – DOI: 10.3390/s21186099