

**ВАНЧАК ВІТАЛІЙ**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0009-0004-1329-4973>e-mail: [vitaliyvanchak@gmail.com](mailto:vitaliyvanchak@gmail.com)**МЕЛЬНИЧУК СТЕПАН**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-6973-4235>e-mail: [stenni@ukr.net](mailto:stenni@ukr.net)

## РЕАЛІЗАЦІЇ СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ПОВЕРХНЕВИХ СИГНАЛІВ НИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ

*Моніторинг геосигналів один з інструментів для спостереження за стійкістю, надійністю і безпекою транспорту, будівельних та інженерних споруд, проведення охорони периметру, дослідження геологічних змін об'єктів дослідження. В роботі наведено огляд п'яти систем моніторингу периметру для детектування переміщення в радіусі спостереження об'єктів та їх класифікація за допомогою опрацювання геосигналів, їх характеристики, методи передачі даних до кінцевого користувача чи оператора. Наведено ключові напрямки вдосконалення існуючих систем та які потребують подальшого розвитку.*

*Ключові слова: комп'ютерні системи, моніторинг, геосигнали*

**VANCHAK VITALII****MELNYCHUK STEPAN**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## IMPLEMENTATION OF OBJECT MOVEMENT MONITORING SYSTEMS BASED ON LOW-FREQUENCY SURFACE SIGNALS

*Geosignal monitoring utilized as a crucial technological tool for observing and analyzing the stability, reliability, and safety in various areas of use, including transportation networks, construction projects, engineering structures. It is also widely used for securing perimeters, conducting geological research, and tracking changes in observed objects. This study focuses on the review of eight geosignal-based perimeter monitoring systems, which are designed to detect movement within a designated observation radius and classify objects based on the processing of geosignal data.*

*The paper provides a detailed analysis of the operational principles of these systems, with an emphasis on their capabilities in object detection and classification, methods of transferring information, and accessibility for end users. Key system attributes, including detection range for different class of objects, distance of radio signal transmission and used frequency range, operational duration, dimensions, and weight,*

*Furthermore, the study highlights the current challenges and limitations of existing geosignal monitoring technologies, such as the need for higher efficiency, while keeping compact size and long work duration, optimization of system data transferring steps. Several promising directions for future research and development are proposed, including the improvement signal processing methods, development of more robust algorithms for geosignal interpretation, decrease of data transfer steps from geosignal monitoring devices to the end user.*

*By addressing these issues, the potential of geosignal monitoring systems can be further improve their capability and usability, ensuring greater effectiveness, flexibility and adaptability in various environments. This comprehensive review offers insights into the current state of the technology and underscores its importance in advancing modern monitoring solutions.*

*Keywords: computer systems, monitoring, geosignals.*

### Вступ

Поточний розвиток інформаційно-вимірювальних каналів, зокрема орієнтованих на повергненні хвилі низькочастотного діапазону, передбачає імплементацію для вирішення задач різного типу. Серед таких задач є забезпечення безпеки та стійкості інженерних споруд, критичної інфраструктури та природних екосистем. Крім того, важливого значення набуває реалізація систем моніторингу на основі згаданих інформаційних каналів, оскільки вони дозволяють, в режимі реального часу, реєструвати та аналізувати динаміку подій контрольованих поверхонь, виявляти потенційні геологічні загрози а також передбачати можливі деформаційні процеси. Основним джерелом даних, в таких системах, є магнітоіндуктивні первинні перетворювачі низької частоти – геофони. Крім того, використовують і інші типів сенсорів, зокрема: акселерометри, п'єзоелектричні, оптичні і навіть механічні, що у поєднанні з сучасними цифровими методами опрацювання забезпечує розширення інформативних складових вимірювальних сигналів. До переваг згаданих перетворювачів можна віднести: стійкість до радіо-завад, низька чутливість до атмосферних, акустичних, температурних, магнітних явищ, однакова ефективність роботи впродовж доби, дозволяє фіксувати сигнали подій, як на поверхні так і під нею а атож енергоефективність, що робить такі вимірювальні перетворювачі перспективним джерелом інформації для задач моніторингу.

Системи моніторингу та контролю параметрів, що реалізуються на основі інформаційно-вимірювальних каналів з геофонами, часто використовують для вирішення задач виявлення порушень периметрів об'єктів різного роду. Такі системи орієнтовані на виявлення поверхневих хвиль зумовлених вібраційними процесами, що дозволяє фіксувати, в окремих випадках ідентифікувати, критичні порушення чи надмірну активність. Такий підхід дозволяє оперативне реагувати на перед критичні та критичні ситуації, знижує ризики порушень контрольованого периметру. [1 – 4]

Іншою сферою застосування згаданих систем є моніторинг інженерних та будівельних споруд. Він необхідний для забезпечення їхньої стабільності, безпеки та довговічності. Вібраційний контроль дозволяє виявляти аномалії, спричинені зовнішніми факторами, такими як вітер, землетруси чи транспортні навантаження, а також внутрішніми дефектами, зокрема: тріщини, ослаблення з'єднань тощо. Це сприяє ранньому виявленню загроз, запобіганню аваріям і оптимізації технічного обслуговування, що є особливо важливим для об'єктів критичної інфраструктури. [5 – 8]

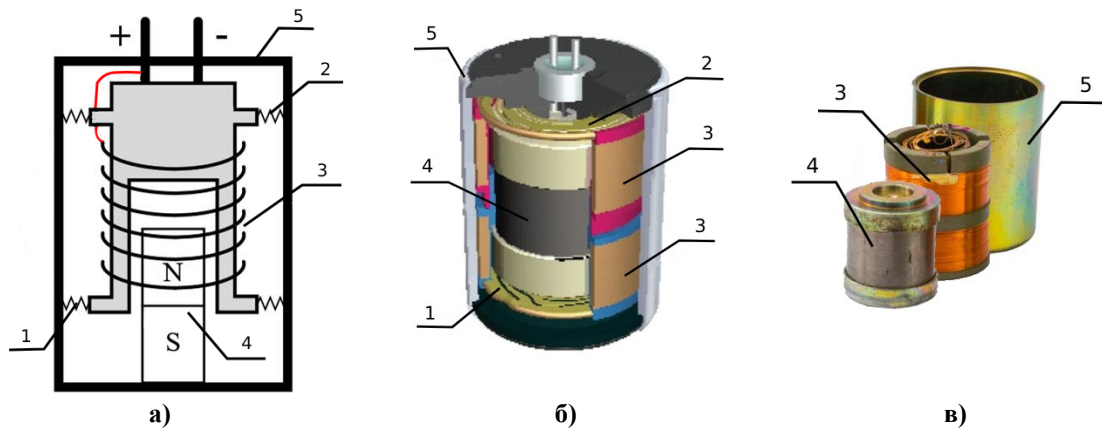
Також інтенсивно розвиваються системи моніторингу вібрацій у сфері транспорту, які необхідні для підвищення безпеки, комфорту пасажирів і ефективної роботи транспортних шляхів, розв'язок а також засобів перевезення. [9, 10]

Слід зазначити, що залучення сучасних методів цифрового опрацювання сигналів дозволяє розширити як технічні так і функціональні можливості інформаційно-вимірювальних систем такого типу, що у свою чергу може дозволити реконструювати складні просторово-часові залежності, прогнозувати потенційні зміни, ризики з високим ступенем вірогідності тощо.

**Метою роботи є:** огляд функціоналу та характеристик сучасних систем та пристроїв моніторингу об'єктів, що реалізуються на основі опрацювання поверхневих сигналів низької частоти.

#### Результат дослідження

Традиційним джерелом інформації систем виявлення поверхневих хвиль є геофони, які дозволяють перетворити поздовжні і поперечні коливання поверхні у пропорційні електромагнітні коливання, які в подальшому опрацьовуються. Перетворювачі такого типу мають типову конструкцію, що складається з двох пружин (рис. 1а - 1 та рис 1а - 2) на яких коливається електромагнітна котушка (рис 1а - 3). Коливальні рухи котушки вдовж магнітного осердя (рис. 1а - 4) зумовлюють генерування вихідного електричного сигналу, що подається на виводи геофона, які виведені назовні з корпусу (рис 1а - 5). Також можлива інша конструкція, коли магнітна серцевина на пружинах коливається в котушках, що генерують вимірювальний сигнал. [11]



а) структура; б) внутрішня конструкція; в) компоненти  
Рис. 1. Типовий геофон

Типовим варіантом такого перетворювача може бути магнітно-індуктивний геофон ST-10PN, який має частоту перетворення: 10 Гц.  $\pm$  2,5%, габарити: 25,4x25,4x32 мм, вага: 74г, функціонує в температурному діапазоні від -40° С до +100° С, опір котушки 375  $\pm$  2,5% Ом, рухому масу 11 г, максимальний хід котушки 2 мм та максимальний кут нахилу 10°. АЧХ ST-10PN подано на рис. 2. [12]

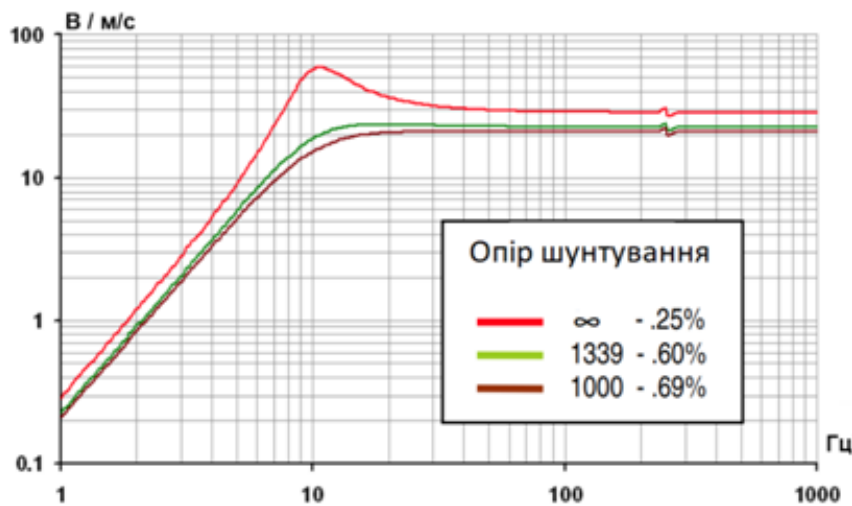
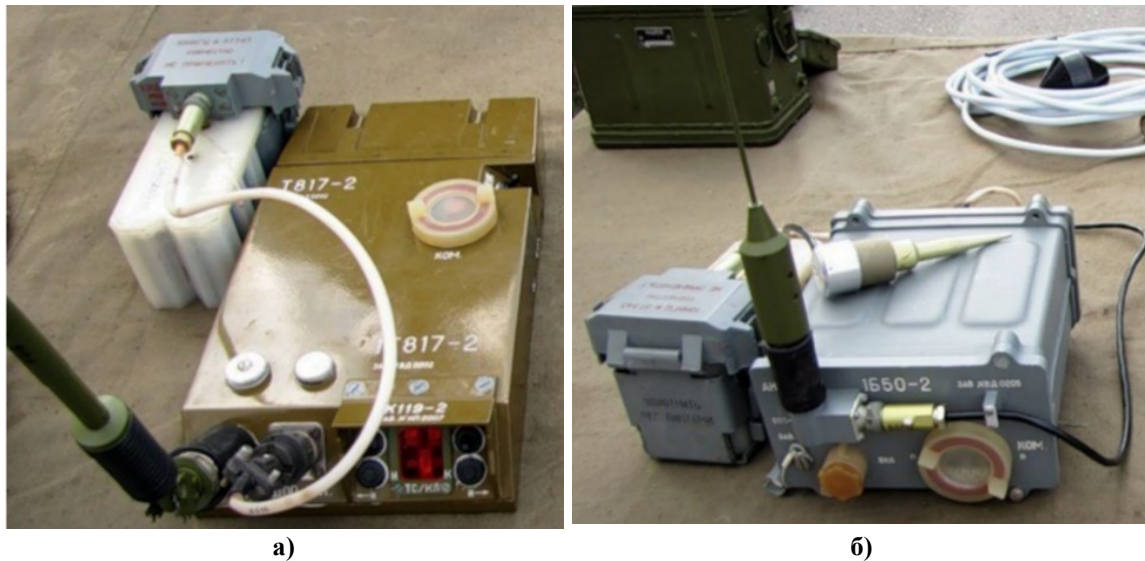


Рис. 2. АЧХ магнітоіндуктивного геофона ST-10PN

Демпфування чутливого елемента у відкритому колі 0.25, при шунтуючому резисторі 1339 Ом –  $0.6 \pm 5\%$ , а при резисторі 1000 Ом –  $0.686 \pm 5\%$ . Чутливість:  $28.8 \pm 2.5\% \frac{B}{M/c}$  при відкритому колі,  $22.5 \pm 2.5\% \frac{B}{M/c}$  при шунтуючому резисторі 1339 Ом і  $20.9 \pm 2.5\% \frac{B}{M/c}$  при шунтуючому резисторі 1000 Ом. ST-10PN може давати гармонійні спотворення до 0.1% і має типову паразитарну частоту більше 240 Гц. [12]

Однією з систем яка використовує для детектування об'єктів опрацювання низькочастотних поверхневих сигналів є система 1K119 "Реалія-1/10", пристрої якої зображені на рис. 3. Вона є результатом розробки спеціалізованих конструкторських бюро промислових підприємств радянського союзу, в тому числі і нашої країни, в кінці 80-х років двадцятого століття. Комплекс пристроїв призначений для фіксації об'єктів за поверхневими сигналами і передачі інформації по радіоканалу УКХ частот. Система складається з пристроєм формування і передачі інформаційних сигналів 1Б50, пристроєм отримання і відображення інформації 1Т817, ретранслятора інформаційних радіосигналів 1Л516, та приладу контролю траси 516ПКТ. Пристрої детектування об'єктів 1Б50, хоч і мають автоматичні алгоритми детектування і класифікації об'єктів та власне джерело живлення, але такі пристрої потребують ручного встановлення оператором, яке складає 5-10хв. Моніторинг системи може бути здійснений лише з пристроєм 1Т817. Також є модернізована версія даної системи 1K144. [13, 14]



а) – прилад прийому інформації 1Т817; б) – пристрій передачі і формування інформаційних сигналів 1Б50  
Рис. 3. Комплектація системи 1K119 "Реалія-1/10":

Пристрій 1Б50 системи Реалія 1/10 може фіксувати три типи об'єктів виносними геофонами за низькочастотним геосигналом - людей, колісний транспорт та гусеничний транспорт; проте система класифікує колісний і гусеничний транспорт разом як один тип об'єктів фіксації. Пристрій 1Б50 виконує функцію збору сигналу, усунення шумів, формування повідомлень та їх відправлення в закодованому вигляді. Він здатний детектувати людей до 50м, колісний транспорт до 100м, гусеничний транспорт до 300м. [13, 14]

Передача даних в системі відбувається радіосигналом в УКХ діапазоні зашифрованими 16-бітними пакетами, в яких перші 7 біт займає номер пристрою, серед яких перші 40 номерів виділяються для пристроїв 1Б50, а решта 7 номерів для пристроїв ретрансляції 1Л516, 1 біт - клас об'єкту, 1 біт - стан фіксації об'єкту, 3 біти - тип повідомлення, 1 біт - біт зв'язку, який вказує чи проходило повідомлення ретранслятор, 3 біти - кодове число системи, яке потрібно для фіксації чи повідомлення належить системі. Пристрій фіксації об'єктів 1Б50 може передавати дані до 5 км, а ретранслятор 1Л516 може розширити передачу даних до пристрою прийому інформації 1Т817 ще на 18 км. [13, 14]

Однією з найбільш функціональних систем, що включає опрацювання низькочастотних поверхневих сигналів, мережею автономних вузлів з давачами, які комунікують між собою та іншими апаратними засобами моніторингу, є REMBASS II AN/GSR-8(V), що є вдосконаленням попередніх систем REMBASS і IREMBASS, є результатом розробки компанії L3 Harris, які беруть свій початок в 90-х роках минулого століття і модернізується по сьогоднішній день. Система, рис. 4, використовує три види пристроїв та модулів з давачами: комбінований сейсмоакустичний, магнітний та інфрачервоний. Відомо також що система дозволяє підключення і інших типів сенсорів, без внесення змін в апаратну та програмну частину, таких як хімічні/біологічні, радіочастотні, метеорологічні, тощо. За потреби оператор може використовувати для моніторингу портативний пристрій AN/PSQ-16 або підключивши через вхід RS232 цей портативний пристрій до польового комп'ютера з встановленими програмним забезпеченням Advanced Monitoring Display System, скорочено AMDS. Портативний пристрій AN/PSQ-16 також може бути використаний для дистанційного налаштування автономних вузлів та ретрансляторів. [15, 16]



а) радіо ретранслятор RT-1175C/GSQ; б) компактний пристрій моніторингу, індексації та програмування AN/PSQ-16; в) польовий комп'ютер; г) інфрачервоний модуль МК-2967/GSR; р) сейсмоакустичний пристрій МК-2965/GSR; д) магнітний сенсорний модуль МК-2966/GSR; е) пристрій FPU

Рис. 4. Комплектація системи REMBASS II

Сейсмоакустичний пристрій МК-2965/GSR, являє собою основний автономний вузол системи моніторингу, що надає інформацію про фіксацію об'єкту спостереження та його класифікацію. Вдосконалений алгоритм для класифікації цілей та оновлене апаратне обладнання дозволяє виявляти та визначити людей, колісні або гусеничні транспортні засоби на основі поєднання сейсмічних та акустичних характеристик. Система використовує низькочастотні повергнені сигнали як основне джерело інформації для задачі детектування переміщення об'єктів та їх класифікації, а акустичний перетворювач відіграє допоміжну роль для покращення функціоналу та дозволяє вивести систему в іншу площину спостереження, що зменшує вплив шумів, проте ускладнює як апаратну та програмну складову системи. Також пристрій може доповнюватись модулями МК-2966/GSR і МК-2967/GSR, які додають до системи магнітний і інфрачервоні давачі відповідно, які дозволяють встановлювати напрямок руху об'єктів та їх кількість. [15]

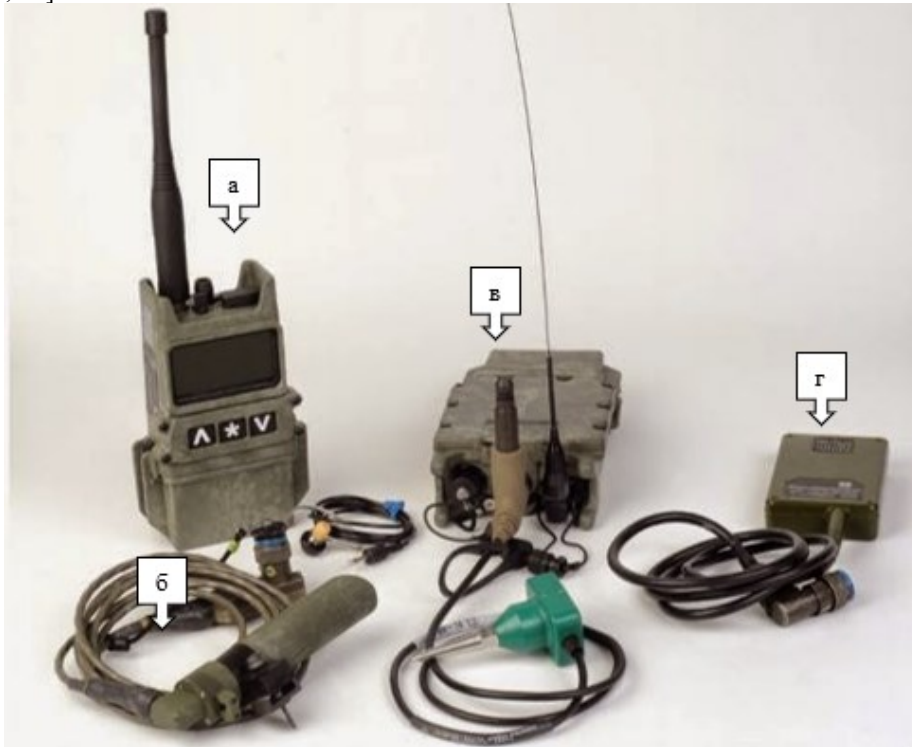
Передача даних між вузлами реалізується в УКХ діапазоні 138-153 МГц частот за допомогою повідомлень: 29 біт REMBASS, 20/29/285 біт TRSS, 101 біт AN/TMQ-30, чи повідомленнями MIDS+EMIDS. Давачі передають повідомлення з даними про цілі на відстань до 15 км, використовуючи короткі імпульсні передачі з низькою ймовірністю перехоплення та виявлення (LPI/LPD). Відстань передачі може бути збільшена за допомогою радіо ретранслятора RT-1175C/GSQ, що дає додаткові 15 км відстані передачі даних, безпілотними літальними апаратами на 150 км і за допомогою супутникового зв'язку через пристрій FPU, можливості покриття відстані сигналу якого залежать на пряму від супутникової мережі. [15, 17, 18].

Система ISR REM-Sense, що розроблена компанією L3 Harris в період 2010-х років, є модернізованою версією системи REMBASS II. Як і попередня система базується на автономних сенсорних вузлах що передають данні в системі по радіочастотному каналі в УКХ діапазоні використовуючи короткі імпульсні передачі даних. REM-Sense, комплектація якої зображено на рис. 5, також використовує три види пристроїв та модулів з давачами: сейсмоакустичний, інфрачервоний і магнітний. Для відображення даних та налаштування компонентів системи використовується малогабаритний переносний монітор-передатчик (ННМ/Т). Пристрій також можна підключити до комп'ютера через порт RS232, що дозволяє відображати виявлені об'єкти на мапі та проводити з нього моніторинг периметру спостереження. [19]

Сейсмоакустичний пристрій S/T як і в системі REMBASS II застосовується для детектування та класифікації об'єктів, таких як люди, колісний та гусеничний транспорт, за їх сейсмічними та акустичними показниками. Він використовує геофон як основне джерело інформації, а акустичний давач як допоміжний. Пристрій S/T може доповнюватись модулем з інфрачервоним перетворювачем IRID-II, що дозволяє фіксувати напрямок руху і кількість людей та транспорту за тепловими показниками. Іншим допоміжним модулем є MAGID-II, що за допомогою магнітного давача може також фіксувати напрямок руху. [19]

Система BAIS-i, що розроблена компанією L3 Harris в період 2010-х років, базується на модулях з інтегрованим геофоном, на відміну від попередньо згаданих систем, де геофон є відокремленим і приєднується кабелем до модуля. В даній системі використовується вищезгаданий малогабаритний переносний монітор-передатчик (ННМ/Т), що дозволяє дистанційно конфігурувати та програмувати сенсорні модулі, проводити моніторинг роботи системи з самого пристрою та через підключений до

нього комп'ютер через вхід RS232, а також пристрої моніторингу низькочастотних поверхневих сигналів.[20, 21]



а) малогабаритний переносний монітор-передатчик ННМ/Т; б) інфрачервоний модуль IRID-II; в) сейсмоакустичний пристрій S/T; г) магнітний модуль MAGID-II

Рис. 5. Склад системи ISR REM-Sense

Базовий пристрій моніторингу периметру системи BAIS-i, який зображений на рис. 6а, застосовують для детектування тільки низькочастотний сигнал отриманий з геофону, який опрацьовується в пристрої і за сейсмічними показниками встановлюється класифікація об'єкту. Як і попередні системи, BAIS-i класифікує об'єкти детектування на людей, колісний транспорт і гусеничний транспорт. Система може фіксувати людей до 100м, колісний транспорт до 400м, а гусеничний транспорт до 550м. [20, 21]

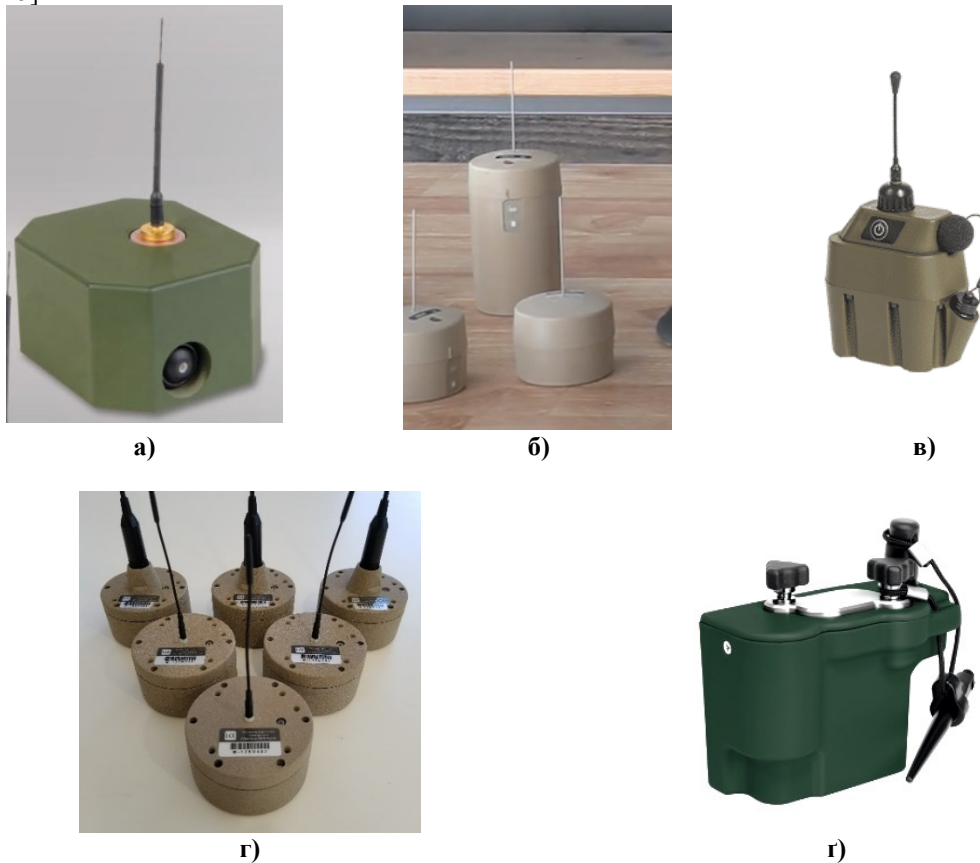
Передача даних в системі відбувається на УКХ радіо частотах в діапазоні 138-153 МГц повідомленнями типу BAIS 29 біт, MBAIS 101 біт, TRSS 29/285 біт, REMBASS 29/101 біт, MIDS+EMIDS, LKMD. Сейсмічний сенсорний пристрій оснащений малопотужним радіо модулем що дозволяє встановлювати двосторонній зв'язок до 2 км. Відстань передачі даних можна збільшити до 10 км встановивши виносну антену на достатню висоту та при прямій видимості без фізичних перешкод. Також можливо використати раніше згаданий сейсмоакустичний пристрій S/T у ролі ретранслятора, що додає 6 км відстані передачі даних. [20, 21]

Система моніторингу E-UGS Pathfinder, що розроблена компанією ARA в період 2000-х років, базується на малогабаритних автономних пристроях моніторингу низькочастотних сигналів двох розмірів з влаштованим геофоном, які передають повідомлення УКХ радіочастотами. Як і попередня розглянута система, детектування об'єктів покладається повністю на низькочастотний геосигнал. Через відсутність шипа геофону, пристрій потрібно закопувати під рівень ґрунту, що дозволить пристрою фіксувати низькочастотний геосигнал через вібрації, які передаються з поверхні до корпусу. Такий спосіб фіксації сигналу є менш ефективним ніж з використанням шипа геофону, але це спрощує конструкцію пристрою і дозволяє краще герметизувати його. Система складається з двох типів автономних сенсорних пристроїв та приймача з виносною антеною, які зображені на рис. 6б, зверху пристрій розміру XL, а знизу пристрій розміру Mini. Давачі передають дані радіоповідомленнями до приймача, який передає їх до підключеного комп'ютера чи іншого мережевого обладнання. Оператор в подальшому може спостерігати за статусом встановлених пристроїв на інтерактивній карті з комп'ютера, підключеного на пряму до приймача або з віддаленим доступом, чи за допомогою мобільного телефону. [22, 23]

Система Pathfinder, як і усі інші розглянуті системи опрацьовує сигнал в самому пристрої і надсилає повідомлення за потреби про статус детектування в радіусі роботи пристрою. Відмінністю її є в тому що сейсмічний пристрій системи не класифікує об'єкти, перед початком встановлення оператор повинен встановити який тип об'єктів має детектувати пристрій, людей чи транспорт. Система може фіксувати людей до 10м, а колісний транспорт до 20м. Що до того чи фіксує система гусеничний транспорт, інформація в знайдених джерелах відсутня. [24]

Передача даних відбувається радіопередачею пакетів в УКХ діапазоні на частоті 916 МГц. Усі пристрої передають дані до приймача, відстань передачі яких до 15 км. Можливість встановлення

ретранслятора сигналу не вказана, проте зазначено що можливо підключити систему до мережі SATCOM, GSM, CDMA. Приймач приєднується до комп'ютера або іншого мережевого обладнання через вхід RJ45. [23 – 25]



а) – BAIS-i; б) – E-UGS Pathfinder;  
в) – Flexnet; г) – WarDog X7; ґ) – Omtrex Compact

**Рис. 6. Пристрої систем моніторингу низькочастотних геосигналів**

Система Flexnet розроблена компанією Bertin Exensor на початку 2000-х та оновлюється по сьогоднішній день, базується на автономних безпроводних малогабаритних пристроях з різним типом давачів для проведення моніторингу переміщення об'єктів. До системи входять наступні пристрої: сейсмоакустичний пристрій Mini Mk3, пристрій з інфрачервоним давачем PIR, пристрій відео спостереження Scout Mk3, пристрій фіксації транспорту Surveyor та приймач радіоповідомлень. Усі пристрої є відокремленими автономними вузлами системи які виконують свою задачу та не потребують прямого фізичного підключення, як у REMBASS II чи REM-Sense. Іншою особливістю системи є режим накопичення даних у інтегрованій пам'яті пристрою, які можуть бути передані за запитом або при відновленні зв'язку пристрою з приймачем, а також в наявності влаштований GPS модулю в кожен пристрій, що дозволяє отримувати точне розміщення кожного вузла системи.[26, 27]

Пристрій Mini Mk3, що зображений на рис. 6в, використовує низькочастотні геосигнали, які фіксуються інтегрованим геофоном та доповнюються акустичним сигналом, що опрацьовуються самим пристроєм. Відомо що програмне забезпечення пристрою здатне класифікувати щонайменше п'ять типів об'єктів переміщення чи подій: людину, групу людей, колісний транспорт, гусеничний транспорт і гелікоптер. Пристрій здатний фіксувати людей до 50 м, незалежно від їх кількості, колісний транспорт до 100 м, гусеничний транспорт до 200 м, гелікоптер до 8 км. Окрім детектування і класифікації об'єктів переміщення, він також здатний фіксувати приблизну відстань до зафіксованого об'єкту. Інший пристрій, призначений для детектування транспорту, Surveyor окрім магнітного і акустичного інформаційного каналу, також застосовує і низькочастотний сигнал, а саме сейсмічний сигнал з геофонів, проте виробник не опублікував інформацію про дальність фіксації та можливості класифікації об'єктів, через що неможливо провести коректне порівняння з іншими пристроями систем, що використовують низькочастотні сигнали. [27]

Система WarDog X7, розроблена компанією Innovative Algorithms і продемонстрована у 2020 році, покладається на компактні автономні універсальні безпроводні пристрої, що передають дані до приймача і в подальшому до кінцевого користувача чи оператора. Базові пристрої моніторингу системи WarDog X7 продемонстровані на рис. 6г. Система використовує сейсмічні, акустичні та магнітні інформаційні канали для детектування переміщення різних об'єктів, та може підтримувати до тисячі вузлів моніторингу. Особливістю системи є застосування одного виду пристрою для реалізації моніторингу системи, можливість фіксації напрямку руху об'єктів, влаштований GPS модуль для встановлення розміщення кожного пристрою системи та можливість безпроводної зарядки пристроїв. В

перспективі компанією розробника заплановане додавання можливості фіксації кроків за акустичним давачем, голосові команди, фіксація безпілотних літальних апаратів.[28, 29]

Базовий пристрій системи використовує низькочастотний сигнал, а саме сейсмічний сигнал, як основний інформаційний канал, а акустичний і магнітний інформаційні канали виконують допоміжну роль. Як заявлено виробником, система може класифікувати 8 типів об'єктів переміщення та подій, серед яких люди та транспорт. Достовірно невідомо, які види транспорту здатна фіксувати і класифікувати система, оскільки інформація в публічних джерелах відсутня по даному питанню. За сейсмічним сигналом пристрій здатен фіксувати людей до 140м без фіксування напрямку і до 90 м з фіксацією напрямку руху об'єкту, а транспорт до 300м.[28, 29]

Система Omtrex Compact розроблена компанією Sens-Ör Solutions Kft. в 2020-х роках та покладається на набір автономних безпроводних компактних пристроїв серед яких є і пристрій CGS, рис. бг, що використовує низькочастотний сигнал. Інші пристрої використовуються для детектування за відео каналом та за розривом електричного контуру. Пристрій CGS використовує тільки сейсмічний сигнал, за яким може виявляти і класифікувати людей та транспорт. Детектування людей можливе в радіусі до 100 м, а транспорту до 200 м. Система функціонує в УКХ частоті 433 МГц за сітчастою топологією (Mesh). Відстань передачі даних невідома, проте відомо що для розширення передачі радіоповідомлень, окрім інших пристроїв моніторингу, передбачено використання ретранслятору CNR. [30]

За розглянутими системами сформовано порівняльну таблицю з наведеними параметрами детектування та часу роботи їх пристроїв, які подано в таблиці 1 та окремо подано інформацію про комунікаційні параметри системи та фізичні параметри розглянутих пристроїв детектування в таблиці 2.

Таблиця 1

**Характеристики детектування та автономності розглянутих систем на основі каналів з геофонами**

Система моніторингу	Параметри				
	Макс. відстань детектування (метри)			Додаткові канали детектування	Тривалість роботи (днів)
	Люди	Колісний транспорт	Гусеничний транспорт		
Реалія 1/10	50	100	300	-	10
REMBASS II	75	250	350	Акустичний, магнітний, інфр.черв.	30
ISR, REM-Sense	75	350	450	Акустичний, магнітний, інфр.черв.	140
BAIS-i	100	400	550	-	200
Pathfinder	10	20	-	-	183 (Mini), 731 (XL)
Flexnet	50	100	200	Акустичний, магнітний, інфр.черв., візуальний	30
WarDog X7	140	300	-	Акустичний, магнітний	7 (Mesh), 20 (P2P)
Omtrex Compact	100	200	-	Візуальний, цілісності електричн. кола	5

Таблиця 2

**Комунікації та фізичні параметри розглянутих систем моніторингу на основі каналів з геофонами**

Система моніторингу	Макс. дальність передачі даних між вузлами (км)	Частота комунікації (МГц)	Габаритні розміри (см)	Вага (г)
Реалія 1/10	5	Не вказано	17x13,5 x 9	1500
REMBASS II	15	138-153	18,9x10,4x8	1300
ISR, REM-Sense	6	138-153	19,3 x 10,7 x 5,3	680
BAIS-i	10	138-153	7,6 x 6,4x 3,9	227
Pathfinder	15	916	6,6 x 6,6 x 13 (Mini), 6,6 x 6,6 x 19,56 (XL)	226 (Mini), 456 (XL)
Flexnet	1	Не вказано	11.5 x 5.4 x 10	500г
WarDog X7	0.125(Mesh), 6 (P2P)	915	7,7 x 7,7 x 4,4	240
Omtrex Compact	Не вказано	433	11 x 10,5 x 8	450

Ключову роль у таких системах відіграє цифрове опрацювання сигналів, яке дозволяє перетворювати первинні фізичні вимірювання на високоінформативні масиви даних. Завдяки складним алгоритмам цифрової фільтрації, спектрального аналізу та машинного навчання, поверхневі геосигнали перетворюються на точні та змістовні індикатори стану геологічного середовища та інших об'єктів спостереження, проте складні підходи до опрацювання сигналів не завжди можливі через обчислювальні можливості доступних процесорів та потребу в опрацюванні сигналу між відлік ми первинного перетворювача що ускладнює задачу реалізації таких систем, зокрема для автономного виконання.

### Висновок

З розвитком систем моніторингу переміщення об'єктів на основі поверхневих сигналів низької частоти вдосконалювалась компонентна база пристроїв і програмні рішення, які покращували ефективність роботи систем моніторингу на основі характеристик геосигналів. Як вказувалося в більшості систем, спосіб детектування і класифікація об'єктів покладається на характеристики сигналу, з використанням допоміжних сигналів чи без них.

Усі розглянуті системи базуються на передачі даних в УКХ діапазоні радіочастот з різною схемою передачі даних, хоча у деяких з них і є можливість передавати інформацію іншими каналами зв'язку. Серед розглянутих систем помітний тренд на мініатюризацію, спрощення, як апаратної так і програмної складової пристроїв детектування для збільшення часу роботи, зниження затрат виробництва, покращення зручності встановлення та експлуатації системи. Також усі пристрої потребують розміщення в радіусі приймальної станції або ретранслятора, що задає обмеження для встановлення таких пристроїв по периметру який потребує моніторингу.

Основною проблемою використання таких сенсорів є фільтруючі властивості поверхонь по яких вони поширюються, тобто зі зростанням дистанції до джерела сигналу, його низькочастотні складові затухають, що не дозволяє вирізнити об'єкти на значних відстанях. Іншою проблемою є часові спотворення та утворення дзеркальних представлень за амплітудою, що ускладнюють подальше опрацювання сигналу, серед яких застосування кореляційних методів опрацювання сигналу та проведення спектрального аналізу.

Таким чином, існує ряд задач, які потребують вдосконалення, серед яких збільшення ефективності пристроїв детектування програмними чи апаратними засобами, при збереженні компактності, забезпечення довгої роботи пристроїв від влаштованого акумулятора, зменшення етапів передачі даних від пристрою до оператора або кінцевого користувача, зменшення залежності розміщення пристроїв моніторингу низькочастотних поверхневих сигналів від інших пристроїв системи.

### Література

1. Seismo. Security alarm Seistone with detection performance up to 300 meters [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу: <https://seismo-analytics.com> (дата звернення: 07.12.2024).
2. SensoGuard. Perimeter Security System - Seismic Shield Pro [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу: <https://www.sensoguard.com/perimeter-security-system-seismic-shield-pro/> (дата звернення: 07.12.2024).
3. Koszteczyk B., Vakulya G., Simon G. Forest intrusion detection system with sensor network / Bence Koszteczyk, Gergely Vakulya, Gyula Simon // 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Піза, Італія, 11–14 трав. 2015 р. – [Б. м.], 2015. – DOI: <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2015.7151531> (дата звернення: 07.12.2024). □ □
4. Samkaria R., та ін. □ IOT and XBee triggered based adaptive intrusion detection using geophone and quick response by UAV [Електронний ресурс] : [веб-сайт] / Rohit Samkaria [та ін.] // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Т. 7, № 2.6. – С. 12-18. – DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.6.10059> (дата звернення: 07.12.2024). □ □
5. Geocomp. □ Enhance Bridge Performance with Expert Monitoring [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу: <https://www.geocomp.com/bridge-monitoring/> (дата звернення: 07.12.2024). □ □
6. Structural Vibration Solutions. □ Structural Health Monitoring [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу: <https://svibs.com/structural-health-monitoring/> (дата звернення: 07.12.2024). □ □
7. Rickenmann D., та ін. □ Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers / D. Rickenmann [та ін.] // Earth Surface Processes and Landforms. – 2012. – Т. 37, № 9. – С. 1000–1011. – DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3225> (дата звернення: 07.12.2024).
8. Chowdhury P., та ін. Stand-alone geophone monitoring system for earthen levees / Puja Chowdhury [та ін.] // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2023, Лонг-Біч, США, 12–17 берез. 2023 р. / ред.: Z. Su, M. P. Limongelli, B. Glisic. – [Б. м.], 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2658552> (дата звернення: 07.12.2024).
9. He W., та ін. Geophone-Based Energy Harvesting Approach for Railway Wagon Monitoring Sensor With High Reliability and Simple Structure / Wei He [та ін.] // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 35882–35891. – DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2968089> (дата звернення: 07.12.2024).



10. Толстенко О. В., Цаніді І. М. Метод мобільного вимірювання вібрації / О. В. Толстенко, І. М. Цаніді // Вісник Дніпровського державного аграрно-економічного університету. – 2014. – № 2(34). – С. 52–53. – Режим доступу: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/2244/1/521-Article%20Text-1063-1-10-20150520.pdf> (дата звернення: 07.12.2024). □ □
11. Seis Tech. What Does A Geophone Measure? [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу: <https://www.seis-tech.com/faq/what-does-a-geophone-measure/> (дата звернення: 07.12.2024). □ □
12. Seis Tech. Data Sheet of SM-24, 10hz Equivalent Geophone [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.seis-tech.com/wp-content/uploads/2024/09/data-sheet-of-sm24-10hz-equivalent-geophone.pdf> (дата звернення: 07.12.2024).
13. Технічні умови комплексу 1К119. – Документація.
14. Технічний опис комплексу 1К119. – Документація.
15. L3Harris. REMBASS-II AN/GSR-8(V) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00713997/107924.pdf> (дата звернення: 07.12.2024).
16. Defence Update. □ REMBASS II – Remotely Monitored Battlefield Sensor System [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу: [https://defense-update.com/20060107\\_rembass-ii-remotely-monitored-battlefield-sensor-system.html](https://defense-update.com/20060107_rembass-ii-remotely-monitored-battlefield-sensor-system.html) (дата звернення: 07.12.2024). □ □
17. Пшоннік В. О. Охоронні системи швидкого розгортання. Сучасний стан і тенденції розвитку / В. О. Пшоннік // Сучасний захист інформації. – 2018. – № 1. – С. 59–65. – Режим доступу: <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/1795/1705> (дата звернення 07.12.2024).
18. REMBASS-II: the status and evolution of the Army's unattended ground sensor system [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / SPIE. Digital library. – Режим доступу: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4743/1/REMBASS-II--the-status-and-evolution-of-the-Armys/10.1117/12.448390.full> (дата звернення 07.12.2024).
19. Intelligence, Surveillance & Reconnaissance (ISR) UGS [Електронний ресурс]/ L3Harris. – Режим доступу: [web.archive.org/web/http://www2.l-3com.com/cs-east/pdf/baisisr.pdf](http://www2.l-3com.com/cs-east/pdf/baisisr.pdf) (дата звернення 07.12.2024).
20. Battlefield Anti-Intrusion System BAIS-i [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / L3Harris. – Режим доступу: <https://www.yumpu.com/en/document/read/41729521/sense-l-3-communications> (дата звернення 07.12.2024).
21. Концептуальні підходи застосування бездротових сенсорних мереж арміями передових країн світу/ В. Машталір [та ін.] // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 96–112. – DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112> (дата звернення 09.12.2024).
22. ARA'S E-UGS/Pathfinder Highlighted for Border Surveillance Capabilities [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / ARA. – Режим доступу: <https://www.ara.com/news/aras-e-ugspathfinder-highlighted-border-surveillance-capabilities/> (дата звернення 07.12.2024).
23. Expendable Unattended Ground Sensor (E-UGS) – Pathfinder [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / BSS Holand. – Режим доступу: <https://bssholland.com/product/expendable-unattended-ground-sensor-e-ugs-pathfinder/> (дата звернення 07.12.2024).
24. Pathfinder Overview [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / ARA. – Режим доступу: <https://www.ara.com/pathfinder/pathfinder-overview/?playlist=05adb04&video=32783cc> (дата звернення 07.12.2024).
25. Products. Expendable Unattended Ground Sensor (E-UGS) – Pathfinder [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / BSS Holand. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20211024032212/https://bssholland.com/products/unattended-ground-sensors-ugs-pathfinder/> (дата звернення 07.12.2024).
26. Unattended Ground Sensors – UGS [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / Bertin Exensor. – Режим доступу: <https://www.exensor.com/products/flexnet-flexible-network-of-sensors/unattended-ground-sensors-ugs/> (дата звернення 07.12.2024).
27. Mini Mk3 [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / Bertin Exensor. – Режим доступу: <https://www.exensor.com/products/flexnet-flexible-network-of-sensors/unattended-ground-sensors-ugs/mini-mk3/> (дата звернення 07.12.2024).
28. X7 WarDog Advanced Tactical Unattended Ground Sensor (UGS) [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. / SystemInnovative Algorithms. – Режим доступу: <https://innoalgo.com/x7-wardog-tactical-ugs/> (дата звернення 07.12.2024).
29. WarDog X7 Seismic/Acoustic/Magnetic Unattended Ground Sensors. Datasheet. [Електронний ресурс] / System Innovative Algorithms. – Режим доступу: <https://innoalgo.com/tech/wp-content/uploads/2020/05/X7-WarDog-Spec-Sheet.pdf> (дата звернення 07.12.2024).
30. Omtrex Compact. Unattended Ground Sensor System. [Електронний ресурс] / Sens-Or. – Режим доступу: <https://sens-or.com/product/omtrex-compact-ground-sensor-system/> (дата звернення 07.12.2024).

## References

1. Security alarm Seistone with detection performance up to 300 meters [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Seismo. – Rezhym dostupu: <https://seismo-analytics.com> (Data zvernennia 07.12.2024).

2. Perimeter Security System - Seismic Shield Pro [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – SensoGuard. – Rezhym dostupu: <https://www.senso-guard.com/perimeter-security-system-seismic-shield-pro/> (Data zvernennia 07.12.2024).
3. Koszteczyk B. Forest intrusion detection system with sensor network / Bence Koszteczyk, Gergely Vakulya, Gyula Simon // 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Pisa, Italy, 11–14 May 2015. – [S. 1.], 2015. – DOI: <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2015.7151531> (Data zvernennia 07.12.2024).
4. IOT and XBee triggered based adaptive intrusion detection using geophone and quick response by UAV/ Rohit Samkaria [et al.] // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, no. 2.6. – P. 12 – 18. – DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.6.10059> (Data zvernennia 07.12.2024).
5. Enhance Bridge Performance with Expert Monitoring [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – Geocomp. – Rezhym dostupu: <https://www.geocomp.com/bridge-monitoring/> (Data zvernennia 07.12.2024).
6. Structural Health Monitoring [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – Structural Vibration Solutions. – Rezhym dostupu: <https://svibs.com/structural-health-monitoring/> (Data zvernennia 07.12.2024).
7. Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers / Dieter Rickenmann [et al.] // Earth Surface Processes and Landforms. – 2012. – Vol. 37, no. 9. – P. 1000–1011. – DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3225> (Data zvernennia 07.12.2024).
8. Stand-alone geophone monitoring system for earthen levees / Puja Chowdhury [et al.] // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2023, Long Beach, United States, 12–17 March 2023 / ed. by Z. Su, M. P. Limongelli, B. Glisic. – [S. 1.], 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2658552> (Data zvernennia 07.12.2024).
9. Geophone-Based Energy Harvesting Approach for Railway Wagon Monitoring Sensor With High Reliability and Simple Structure/ Wei He [et al.] // IEEE Access. – 2020. – T. 8. – C. 35882–35891. – DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2968089> (Data zvernennia 07.12.2024).
10. Tolstenko O. V. Metod mobilnogo vymiriuvannia vibratsii / O. V. Tolstenko, I. M. Tsanidi // Visnyk Dniprovskoho derzhavnogo aharno-ekonomichnogo universytetu. – 2014. – No. 2(34). – P. 52–53. – Rezhym dostupu: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/2244/1/521-Article%20Text-1063-1-10-20150520.pdf> (Data zvernennia 07.12.2024).
11. What Does A Geophone Measure? [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – Seis Tech. – Rezhym dostupu: <https://www.seis-tech.com/faq/what-does-a-geophone-measure/> (Data zvernennia 07.12.2024).
12. Data Sheet of SM-24, 10hz Equivalent Geophone [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – Seis Tech. – Rezhym dostupu: <https://www.seis-tech.com/wp-content/uploads/2024/09/data-sheet-of-sm24-10hz-equivalent-geophone.pdf> (Data zvernennia 07.12.2024).
13. Tekhnichni umovy kompleksu 1K119. – Data sheet.
14. Tekhnichniy opys kompleksu 1K119. – Data sheet.
15. REMBASS-II AN/GSR-8(V) [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – L3Harris. – Rezhym dostupu: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00713997/107924.pdf> (Data zvernennia 07.12.2024).
16. REMBASS II – Remotely Monitored Battlefield Sensor System [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / Defence update. – Rezhym dostupu: [https://defense-update.com/20060107\\_rembass-ii-remotely-monitored-battlefield-sensor-system.html](https://defense-update.com/20060107_rembass-ii-remotely-monitored-battlefield-sensor-system.html) (Data zvernennia 07.12.2024).
17. Pshonnik V. O. Okhoronni systemy shvydkoho rozghortannia. Suchasnyi stan i tendentsii rozvytku/ V. O. Pshonnik // Suchasnyi Zakhyst Informatsii. – 2018. – No. 1. – P. 59–65. – Rezhym dostupu: <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/1795/1705> (Data zvernennia 07.12.2024).
18. REMBASS-II: the status and evolution of the Army's unattended ground sensor system [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – SPIE. Digital library. – Rezhym dostupu: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4743/1/REMBASS-II--the-status-and-evolution-of-the-Armys/10.1117/12.448390.full> (Data zvernennia 07.12.2024).
19. Intelligence, Surveillance & Reconnaissance (ISR) UGS [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – L3Harris. – Rezhym dostupu: <http://www2.l-3com.com/cs-east/pdf/baisir.pdf> (Data zvernennia 07.12.2024).
20. Battlefield Anti-Intrusion System BAIS-i [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – L3Harris. – Rezhym dostupu: <https://www.yumpu.com/en/document/read/41729521/sense-l-3-communications> (Data zvernennia 07.12.2024).
21. Kontseptualni pidkhody zastosuvannia bezdrovovykh sensorykh merezh armiiamy peredovykh krain svitu/ V. Mashtalir [et al.] // Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. – 2023. – T. 47, № 2. – C. 96–112. – DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112> (Data zvernennia 07.12.2024).
22. ARA'S E-UGS/Pathfinder Highlighted for Border Surveillance Capabilities [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – ARA. – Rezhym dostupu: <https://www.ara.com/news/aras-e-ugspathfinder-highlighted-border-surveillance-capabilities/> (Data zvernennia 07.12.2024).
23. Expendable Unattended Ground Sensor (E-UGS) – Pathfinder [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – BSS Holand. – Rezhym dostupu: <https://bssholland.com/product/expendable-unattended-ground-sensor-e-ugs-pathfinder/> (Data zvernennia 07.12.2024).
24. Pathfinder Overview [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / ARA. – Rezhym dostupu: <https://www.ara.com/pathfinder/pathfinder-overview/?playlist=05adb04&video=32783cc> (Data zvernennia 07.12.2024).
25. Products. Expendable Unattended Ground Sensor (E-UGS) – Pathfinder [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. – BSS Holand. – Rezhym dostupu: <https://web.archive.org/web/20211024032212/https://bssholland.com/products/unattended-ground-sensors-ugs-pathfinder/> (Data zvernennia 07.12.2024).
26. Unattended Ground Sensors – UGS [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / Bertin Exensor. – Rezhym dostupu: <https://www.exensor.com/products/flexnet-flexible-network-of-sensors/unattended-ground-sensors-ugs/> (Data zvernennia 07.12.2024).
27. Mini Mk3 [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / Bertin Exensor. – Rezhym dostupu: <https://www.exensor.com/products/flexnet-flexible-network-of-sensors/unattended-ground-sensors-ugs/mini-mk3/> (Data zvernennia 07.12.2024).
28. X7 WarDog Advanced Tactical Unattended Ground Sensor (UGS) [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / System Innovative Algorithms. – Rezhym dostupu: <https://innoalgo.com/x7-wardog-tactical-ugs/> (Data zvernennia 07.12.2024).
29. WarDog X7 Seismic/Acoustic/Magnetic Unattended Ground Sensors. Datasheet. [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / System Innovative Algorithms. – Rezhym dostupu: <https://innoalgo.com/tech/wp-content/uploads/2020/05/X7-WarDog-Spec-Sheet.pdf> (Data zvernennia 07.12.2024).
30. Omtrex Compact. Unattended Ground Sensor System. [Elektronnyi resurs] : [vėb-sait]. / Sens-Or. – Rezhym dostupu: <https://sens-or.com/product/omtrex-compact-ground-sensor-system/> (Data zvernennia 07.12.2024).