

Варава Іван Андрійович

к.т.н., доцент кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ,
Україна
ORCID: 0000-0001-9874-016X
E-mail: varava_ivan@iit.kpi.ua

Майоров Іван Денисович

магістрант кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ,
Україна
ORCID: 0009-0007-9580-8799
E-mail: denatarelcom2105@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ДЕРЕВ РІШЕНЬ У ЗАДАЧАХ ІНТЕРПРЕТОВАНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

У статті розглянуто застосування алгоритмів дерев рішень для задач інтерпретованої класифікації гідроакустичних сигналів у складних умовах морського середовища. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю поєднання автоматизованого аналізу підводних акустичних даних із можливістю пояснення результатів класифікації, що є критично важливим для моніторингових і безпекових систем. Основну увагу приділено rule-based підходу, який дозволяє формувати класифікаційні рішення на основі логічних правил із чітким фізичним та семантичним трактуванням, без використання складних нейронних моделей типу «чорної скриньки». У роботі проаналізовано особливості гідроакустичних сигналів як об'єкта класифікації, зокрема їх нестационарний характер, зашумленість та залежність від параметрів водного середовища. Запропоновано узагальнену схему побудови дерева рішень на основі акустичних ознак сигналів, таких як спектральні характеристики, рівень інтенсивності, статистичні параметри та часові особливості. Показано, що кожен шлях у дереві рішень може бути представлений у вигляді rule-based правила виду «якщо–то», що забезпечує прозорість і контрольованість процесу прийняття рішень. Розглянуто приклад практичного застосування поєднання статистичного аналізу, порогової rule-based класифікації та методів машинного навчання для обробки гідроакустичних даних північно-західної частини Чорного моря. Показано, що використання дерев рішень дозволяє ефективно працювати за умов обмежених навчальних вибірок, зменшувати ризик перенавчання та адаптувати модель до експертних правил. Отримані результати підтверджують доцільність застосування алгоритмів дерев рішень у практичних системах гідроакустичного моніторингу, де ключовими вимогами є інтерпретованість, адаптивність і надійність класифікації.

Ключові слова: дерева рішень, гідроакустичні сигнали, класифікація, rule-based підхід, інтерпретовані алгоритми, машинне навчання, програмне забезпечення.

Вступ і формулювання проблеми

В сучасних системах гідроакустичного моніторингу важливим завданням є автоматична класифікація підводних сигналів, що походять від різних морських об'єктів. Традиційні підходи, засновані на нейронних мережах, забезпечують високу точність, однак характеризуються низькою інтерпретованістю, що ускладнює їх використання в критичних системах прийняття рішень.

У зв'язку з цим актуальною є розробка та дослідження інтерпретованих алгоритмів класифікації, зокрема дерев рішень, які дозволяють поєднати автоматизований аналіз сигналів із можливістю пояснення отриманих результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема розпізнавання та класифікації гідроакустичних сигналів є предметом активних наукових досліджень, у межах яких застосовуються різноманітні методи машинного навчання та цифрової обробки сигналів. Значна кількість робіт присвячена питанням вилучення інформативних ознак, вибору ефективних алгоритмів класифікації та підвищенню стійкості систем до зашумлення й нестационарності сигналів.

У низці досліджень здійснено порівняльний аналіз методів машинного навчання, що застосовуються для класифікації гідроакустичних сигналів, зокрема спектральних,

статистичних і модельних підходів до вилучення ознак. Показано, що методи розрідженого розкладання мають високу обчислювальну складність і обмежене практичне застосування, тоді як генеративні моделі є ресурсозатратними та не завжди адекватно відображають реальні умови морського середовища. Найбільш універсальним підходом визнано спектральний аналіз на основі перетворення Фур'є, який забезпечує стабільність ознак і прийнятну обчислювальну складність. У межах цих робіт також зазначається, що дерева рішень вирізняються простотою реалізації, непараметричністю та мінімальними вимогами до попередньої підготовки даних [1].

Окремий напрям досліджень присвячено проблемі інтерпретованості моделей глибокого навчання в задачах розпізнавання підводних акустичних цілей. У таких роботах наголошується на обмеженнях нейронних мереж, пов'язаних з їх непрозорою логікою прийняття рішень, та пропонуються підходи до пояснення результатів класифікації з використанням методів візуалізації ознак і карт активації. Показано, що моделі глибокого навчання здебільшого фокусуються на низькочастотних спектральних компонентах і періодичних модуляціях сигналів. Водночас зазначається, що такі підходи залишаються складними з точки зору реалізації та потребують значних обчислювальних ресурсів [2].

Також в деяких роботах досліджено ефективність ансамблевих методів, побудованих на основі дерев рішень, зокрема випадкових лісів, у задачах класифікації гідроакустичних сигналів за умов низького відношення сигнал/шум. Показано, що використання ансамблів дерев дозволяє підвищити точність і стабільність класифікації, зменшити вплив шумів і забезпечити кращу узагальнювальну здатність моделей. Отримані результати підтверджують доцільність застосування деревоподібних структур у задачах обробки гідроакустичних даних [3]. Узагальнений огляд сучасних підходів до розпізнавання підводних акустичних цілей представлено в роботах, де методи класифікації систематизовано за типами: статистичні алгоритми машинного навчання, глибокі нейронні мережі, а також підходи з використанням трансферного навчання та методів розширення даних [4]. Зазначається, що попри високу точність сучасних нейронних моделей, актуальною залишається потреба в інтерпретованих алгоритмах, здатних працювати за умов обмежених навчальних вибірок і забезпечувати пояснюваність результатів.

Аналіз сучасних публікацій свідчить, що поряд із високоточними нейронними моделями важливим напрямом досліджень залишається використання інтерпретованих алгоритмів класифікації, зокрема дерев рішень та їх ансамблевих модифікацій. Це зумовлює доцільність подальших досліджень у напрямі rule-based класифікації гідроакустичних сигналів із можливістю прозорого пояснення отриманих результатів.

Мета та завдання дослідження

Мета статті полягає в уточненні та систематизації можливостей застосування алгоритмів дерев рішень у задачах інтерпретованої класифікації гідроакустичних сигналів, а також у формуванні узагальненої схеми подання класифікаційних рішень у вигляді rule-based правил з урахуванням зашумленості, нестационарності та обмеженості навчальних вибірок.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- проаналізувати особливості гідроакустичних сигналів як об'єкта автоматизованої класифікації;
- розглянути можливості застосування дерев рішень для інтерпретованого аналізу акустичних ознак сигналів;
- узагальнити принцип подання шляхів дерева рішень у вигляді rule-based правил типу «якщо–то»;
- визначити переваги та обмеження використання дерев рішень і rule-based підходу в умовах зашумленості та нестационарності сигналів;
- співвіднести запропоновану логіку інтерпретації з наявними прикладними дослідженнями класифікації гідроакустичних середовищ.

Наукова новизна дослідження полягає в узагальненні підходу до інтерпретації дерев рішень у задачах класифікації гідроакустичних сигналів через систему rule-based правил. Такий підхід дозволяє поєднати статистичні акустичні ознаки, експертні умови прийняття рішень і вимоги до пояснюваності результатів класифікації. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на автоматизоване розпізнавання акустичних середовищ, у статті акцент зроблено на логічній прозорості моделі, можливості експертної перевірки правил та адаптації класифікатора до змінних умов морського середовища.

Основна частина

Особливості гідроакустичних сигналів як об'єкта класифікації

Гідроакустичні сигнали є одним із найбільш складних об'єктів аналізу в задачах автоматичної класифікації, що реалізуються сучасним програмним забезпеченням систем гідроакустичного моніторингу.

На відміну від акустичних сигналів у повітрі, хвилі у воді поширюються зі значно вищою швидкістю та зазнають комплексного впливу фізичних параметрів середовища, таких як температура, тиск, солоність, глибина та рельєф морського дна. Зміна цих параметрів призводить до варіативності швидкості звуку, що, у свою чергу, викликає заломлення звукових променів, багаторазові відбиття від поверхні та дна, а також інтерференцію хвиль. У результаті сигнал, зафіксований гідрофоном, може суттєво відрізнятися від вихідного навіть на невеликих відстанях.

Важливим чинником є наявність інтенсивних фонових шумів як природного, так і антропогенного походження. Природні шуми формуються хвильовою активністю, опадами, біологічними джерелами (риби, морські ссавці) та турбулентними гідродинамічними процесами. Антропогенні шуми пов'язані з судноплавством, роботою портової інфраструктури, підводними інженерними спорудами та військовою технікою [5].

Сукупний вплив цих факторів призводить до значного зниження відношення сигнал/шум, що ускладнює роботу програмного забезпечення автоматичної класифікації гідроакустичних сигналів. Ще однією суттєвою особливістю гідроакустичних сигналів є їх виражений нестационарний характер. Часові, амплітудні та спектральні характеристики сигналів можуть змінюватися навіть у межах одного класу об'єктів залежно від режиму руху, відстані до джерела та умов середовища. Це робить неможливим ефективне використання жорстко фіксованих ознак і вимагає застосування методів часово-частотного аналізу, спектральних перетворень та статистичних показників, які здатні узагальнювати поведінку сигналів у часі.

Таблиця 1

Основні фактори, що впливають на гідроакустичні сигнали та їх класифікацію

Група факторів	Конкретний чинник	Вплив на сигнал	Наслідки для класифікації
Фізичні параметри середовища	Температура, солоність, тиск	Зміна швидкості поширення звуку, заломлення хвиль	Варіативність спектральних та часових ознак
Геометричні умови	Глибина, рельєф дна	Відбиття та багаторазове перевідбиття сигналів	Спотворення амплітудних характеристик
Природні шуми	Хвилі, біологічні джерела	Підвищення рівня фонового шуму	Зниження відношення сигнал/шум
Антропогенні шуми	Судноплавство, техніка	Маскування корисного сигналу	Помилки класифікації, хибні спрацьовування
Нестационарність	Зміна режимів джерела	Нестабільність ознак у часі	Потреба в адаптивних методах аналізу

Гідроакустичні сигнали характеризуються високим рівнем невизначеності, значною зашумленістю та значною варіативністю параметрів. Це зумовлює необхідність використання алгоритмів класифікації, здатних ефективно працювати в умовах обмежених навчальних вибірок і нестабільних ознак.

Для систематизації основних факторів, що впливають на характеристики гідроакустичних сигналів і складність їх класифікації, доцільно розглянути узагальнену характеристику цих впливів, наведену в таблиці 1.

В багатьох прикладних системах, зокрема у військових та моніторингових, важливим є не лише отримання результату класифікації, а й можливість інтерпретації прийнятого рішення. Саме тому доцільним є застосування інтерпретованих моделей у програмному забезпеченні гідроакустичних систем, зокрема дерев рішень, які дозволяють поєднати автоматизовану обробку сигналів з експертним аналізом.

Алгоритми дерев рішень та їх інтерпретованість

Алгоритми дерев рішень є класичними методами машинного навчання, що ґрунтуються на ідеї послідовного розбиття простору ознак за певними критеріями. Кожен внутрішній вузол дерева відповідає перевірці окремої ознаки або умови, а гілки відображають можливі результати цієї перевірки. Кінцеві вузли, або листки, містять рішення щодо належності об'єкта до певного класу, що робить структуру моделі логічно зрозумілою та прозорою.

Загальний процес побудови дерева рішень у програмному забезпеченні систем автоматичної класифікації, можна подати у вигляді поетапного алгоритму, схема якого наведена на рисунку 1.

Як показано на діаграмі, початковим етапом є отримання навчальної вибірки та формування початкового набору ознак, на основі яких здійснюється подальший аналіз даних. Після цього виконується перевірка вибірки на однорідність: якщо всі об'єкти належать до одного класу, створюється листок дерева з призначенням відповідного класу, і обробка даної гілки завершується. Коли вибірка є неоднорідною, алгоритм переходить до обчислення критеріїв розбиття, таких як ентропія, інформаційний приріст або індекс Джині. На основі значень цих критеріїв здійснюється вибір ознаки, яка забезпечує найкраще розділення вибірки на підмножини з мінімальною внутрішньою неоднорідністю. Обрана ознака використовується для розбиття навчальної вибірки за її значеннями.

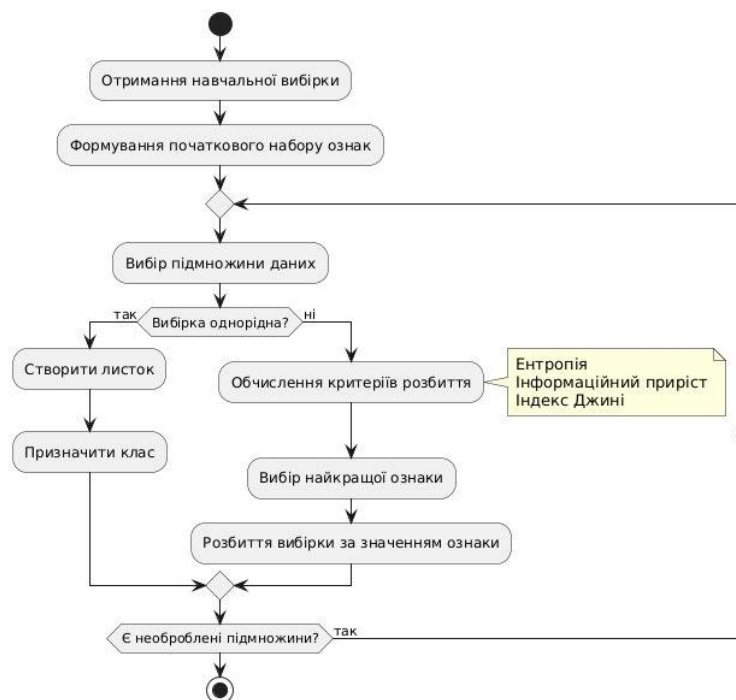


Рис. 1. Діаграма алгоритму побудови дерева рішень

Після формування підмножин даних алгоритм переходить до їх послідовної обробки. Для кожної підмножини виконується рекурсивний виклик алгоритму побудови дерева рішень, що приводить до створення відповідного піддерева. Такий рекурсивний процес повторюється доти, доки залишаються необроблені підмножини або не буде досягнуто умови зупинки, якою є однорідність даних, відсутність доступних ознак або досягнення заданої глибини дерева.

Ключовою перевагою дерев рішень є їх висока інтерпретованість. На відміну від нейронних мереж або інших «чорних ящиків», дерево рішень дозволяє чітко простежити логіку прийняття рішення у вигляді послідовності умов, що особливо наочно відображено у вигляді вузлів і гілок на діаграмі алгоритму. Це має принципове значення в задачах гідроакустичного аналізу, де результати класифікації можуть використовуватися для прийняття відповідальних або критично важливих рішень [6].

Дерева рішень не потребують складної попередньої обробки даних, зокрема нормалізації або масштабування ознак. Вони здатні працювати з різнорідними даними та ефективно застосовуються навіть за умов обмежених навчальних вибірок. Сукупність цих властивостей робить алгоритми дерев рішень доцільним і практично обґрунтованим вибором для задач класифікації гідроакустичних сигналів у реальних, зашумлених і нестабільних умовах.

Rule-based підхід до класифікації сигналів

Rule-based підхід передбачає формування класифікаційних рішень на основі набору логічних правил, що мають чітке семантичне трактування та можуть бути безпосередньо інтерпретовані людиною. У контексті дерев рішень кожен шлях від кореня до листка фактично відповідає одному правилу виду «якщо -то», яке визначає умови віднесення сигналу до певного класу на основі значень вибраних ознак [7]. Формально правило можна подати у вигляді логічної конструкції, що поєднує кілька умов із використанням операторів порівняння та логічних зв'язків. Наприклад, класифікаційне правило може мати вигляд: якщо середнє значення енергії сигналу перевищує заданий поріг і домінуюча частота знаходиться у визначеному діапазоні, то сигнал належить до певного класу. Загальну логіку роботи rule-based класифікатора гідроакустичних сигналів на основі послідовних логічних перевірок проілюстровано на рисунку 2.

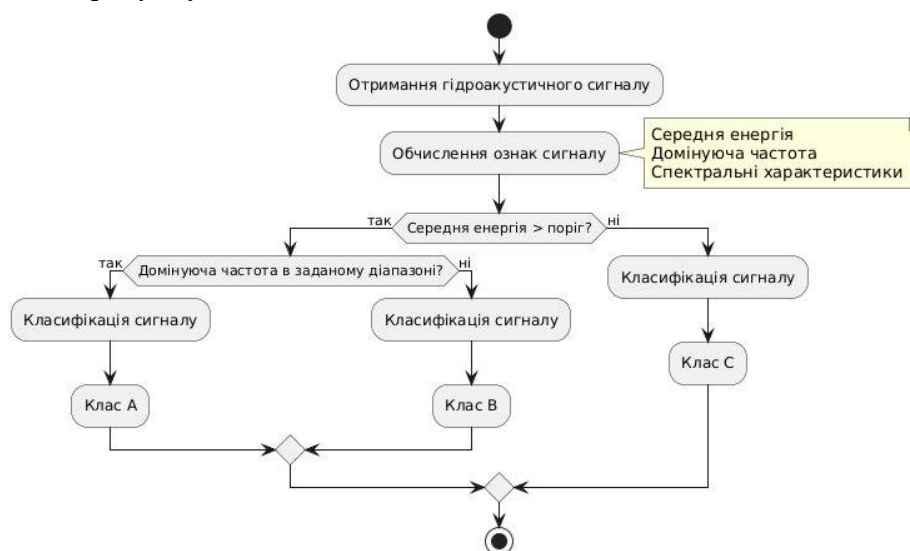


Рис. 2. Діаграма алгоритму роботи Rule-based підходу при класифікації гідроакустичних сигналів

Подана діаграма відображає процес отримання гідроакустичного сигналу, обчислення його основних ознак (зокрема середньої енергії, домінуючої частоти та спектральних характеристик), а також поетапне застосування правил прийняття рішень. Кожен логічний вузол діаграми відповідає окремій умові правила, а переходи між вузлами реалізують механізм

вибору класу залежно від виконання або невиконання заданих порогових критеріїв. Однією з ключових переваг rule-based підходу є можливість інтеграції експертних знань у процес класифікації. У гідроакустиці це має особливе значення, оскільки багато характеристик сигналів безпосередньо пов'язані з фізичними процесами поширення звуку у водному середовищі [8]. Наприклад, наявність стабільних спектральних піків, характерних модуляцій або певного рівня енергетичної насиченості може бути індикатором конкретного типу об'єкта або джерела сигналу.

Rule-based моделі також вирізняються високою гнучкістю та адаптивністю. За необхідності правила можуть бути скориговані, уточнені або доповнені новими умовами без повного перенавчання моделі [9].

Це значно спрощує супровід системи та дозволяє оперативно адаптувати її до змін умов експлуатації, зокрема до варіацій шумового фону або появи нових типів сигналів. На відміну від складних параметричних моделей, rule-based підхід не потребує значних обчислювальних ресурсів і може ефективно застосовуватися в системах реального часу.

Оскільки правила, мають узагальнений характер і ґрунтуються на суттєвих ознаках сигналів, модель демонструє стабільну роботу навіть за умов неповних або зашумлених даних. Водночас використання дерев рішень дозволяє автоматизувати процес побудови таких правил на основі навчальної вибірки, поєднуючи переваги data-driven та експертно орієнтованого підходів. У сукупності зазначені властивості роблять rule-based підхід доцільним для практичних систем гідроакустичного моніторингу, де важливими є не лише точність класифікації, а й прозорість, інтерпретованість та можливість експертного контролю прийнятих рішень.

Переваги та обмеження застосування дерев рішень і rule-based підходу в задачах гідроакустичної класифікації

Застосування алгоритмів дерев рішень і rule-based підходу в задачах класифікації гідроакустичних сигналів має низку суттєвих переваг, що зумовлюють їх доцільність у практичних системах моніторингу та безпеки. Водночас, як і будь-який метод машинного навчання, ці підходи мають певні обмеження, які необхідно враховувати при проектуванні та впровадженні відповідних систем.

Таблиця 2

Переваги та недоліки застосування дерев рішень і rule-based підходу в задачах гідроакустичної класифікації

Аспект	Переваги	Недоліки / обмеження
Інтерпретованість	Прозора логіка прийняття рішень у вигляді послідовності умов «якщо–то»; можливість пояснення результатів класифікації	Обмежена здатність до автоматичного виявлення складних нелінійних залежностей
Робота з зашумленими даними	Стійкість до шуму за рахунок використання узагальнених порогових ознак	Чутливість до некоректного вибору порогових значень
Навчальні вибірки	Ефективна робота за умов обмежених навчальних даних	Погіршення якості класифікації при значному зростанні кількості класів
Обчислювальна складність	Низькі вимоги до обчислювальних ресурсів; придатність для систем реального часу	Можливе зростання складності моделі при надмірній глибині дерева
Адаптивність	Можливість ручного коригування або доповнення правил без повного перенавчання	Потреба в експертному контролі для підтримання актуальності правил
Узагальнювальна здатність	Зменшення ризику перенавчання порівняно зі складними параметричними моделями	Менша точність порівняно з глибокими нейронними мережами у задачах зі складною структурою даних

Для систематизованого аналізу сильних і слабких сторін дерев рішень та rule-based моделей доцільно розглянути їх основні переваги та недоліки в контексті обробки гідроакустичних сигналів, що наведено в таблиці 2. Узагальнення переваг і обмежень дерев рішень та rule-based підходу в задачах класифікації ґрунтується на результатах сучасних порівняльних досліджень методів машинного навчання, у яких аналізуються інтерпретованість, обчислювальна складність і здатність моделей працювати з невизначеністю [10].

Наведений аналіз свідчить, що дерева рішень і rule-based підхід є ефективним компромісом між точністю, інтерпретованістю та обчислювальною ефективністю. Їх основною перевагою є можливість поєднання автоматизованої обробки гідроакустичних сигналів із експертним аналізом, що є особливо важливим у критичних системах прийняття рішень. Водночас обмеження, пов'язані з виявленням складних нелінійних залежностей, можуть бути частково компенсовані використанням ансамблевих методів або гібридних підходів, що поєднують rule-based логіку з методами машинного навчання. Це робить даний підхід перспективним напрямом для подальших досліджень і практичного застосування в системах гідроакустичного моніторингу.

Приклад застосування

Практичне застосування алгоритмів класифікації гідроакустичних сигналів розглянуто на прикладі дослідження «Characterization and Automated Classification of Underwater Acoustic Environments in the Western Black Sea Using Machine Learning Techniques» [11]. Зазначене дослідження використовується в межах цієї статті не як власний експериментальний результат авторів, а як приклад сучасного прикладного підходу до автоматизованої класифікації підводних акустичних середовищ. На його основі в статті акцентовано увагу на можливості подальшої інтерпретації класифікаційних рішень через логіку дерев рішень і rule-based правил.

На початковому етапі здійснюється збір акустичних даних за допомогою пасивних акустичних станцій, розміщених у північно-західній частині Чорного моря. Просторове розташування автономних багатоканальних акустичних реєстраторів (AMARs) наведено на рисунку 3, що ілюструє конфігурацію мережі спостережень для довготривалого моніторингу підводного шумового середовища.

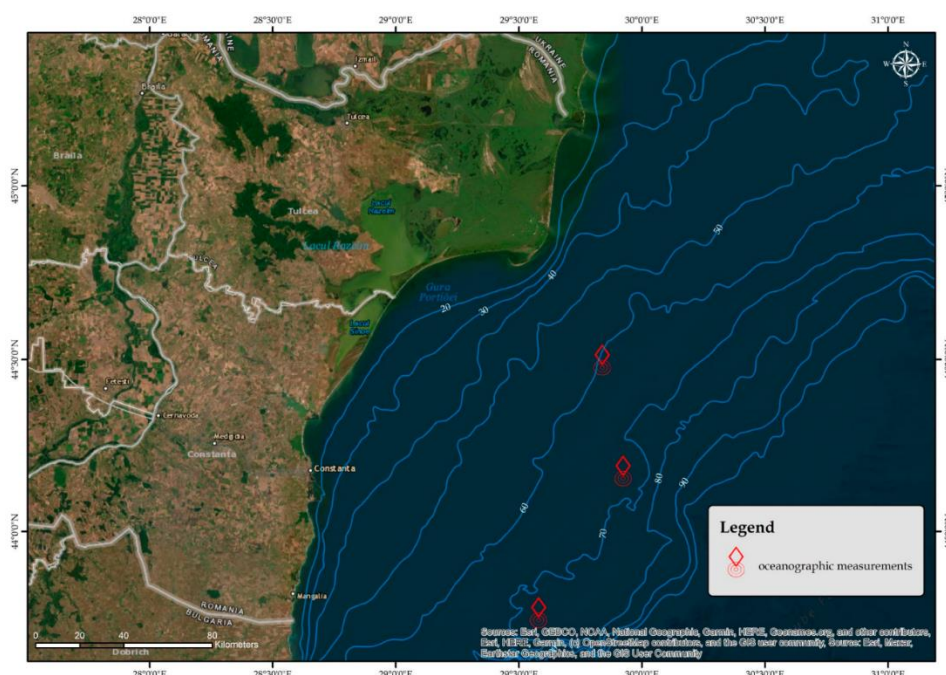


Рис. 3. Пасивні акустичні станції в північно-західній частині Чорного моря [11]

Отримані записи підлягають попередній обробці, яка включає сегментацію, виконання та стандартизацію частоти дискретизації. Для кожного аудіосегмента обчислюються основні акустичні метрики, зокрема спектральна щільність потужності (PSD) та рівень звукового тиску (SSL). Аналіз спектрограми демонструє складну акустичну структуру: у низькочастотному діапазоні (0-512 Гц) спостерігається стійкий фоновий шум, у середніх частотах (512-4096 Гц) гармонічні компоненти, тоді як у високочастотній області (понад 4096 Гц) фіксуються короткочасні імпульсні події.

Подальший етап передбачає статистичний аналіз спектральних характеристик. Для кожного частотного діапазону обчислюються середнє значення, дисперсія та коефіцієнт асиметрії SSL. Ці статистичні ознаки використовуються як для оцінювання фонового шуму, так і для rule-based класифікації з використанням порогових значень. Зокрема, у дослідженні продемонстровано приклади порогової ідентифікації судноплавного та біологічного шуму на основі середнього рівня SSL і асиметрії спектра. Для автоматизованої класифікації сформовані вектори ознак застосовуються в алгоритмах машинного навчання, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN), Random Forest та Support Vector Machine. Ефективність таких моделей оцінюється за допомогою стандартних метрик точності, повноти, F1-міри та ROC-кривих. Порівняння спектральних характеристик фонового та суднового шуму, наочно демонструє домінування антропогенного шуму в низькочастотному діапазоні, що є ключовим фактором для автоматичної класифікації та екологічного моніторингу.

Наведений приклад демонструє актуальність поєднання статистичного аналізу, rule-based підходу та методів машинного навчання для класифікації гідроакустичних сигналів у складних умовах реального морського середовища. Водночас у межах цієї статті основну увагу зосереджено не на повторенні результатів зазначеного дослідження, а на узагальненні можливостей інтерпретації таких класифікаційних рішень за допомогою дерев рішень і логічних правил типу «якщо – то».

Результати дослідження

У результаті проведеного аналізу встановлено, що дерева рішень можуть бути використані як інструмент формування інтерпретованих класифікаційних правил для гідроакустичних сигналів. Узагальнено логіку переходу від акустичних ознак сигналу до rule-based правил, які можуть бути подані у вигляді послідовності умов типу «якщо–то».

Визначено, що найбільш доцільними для побудови таких правил є спектральні характеристики, рівень інтенсивності, статистичні параметри та часові особливості сигналів. Систематизовано переваги й обмеження дерев рішень і rule-based підходу в задачах гідроакустичної класифікації. До основних переваг віднесено інтерпретованість, адаптивність, можливість експертного контролю та відносно низьку обчислювальну складність. Основними обмеженнями визначено чутливість до вибору ознак, порогових значень і складність відображення нелінійних залежностей у разі значного зростання кількості класів. Отримані результати мають прикладне значення для побудови програмних засобів гідроакустичного моніторингу, у яких важливими є не лише точність класифікації, а й пояснюваність, контрольованість та можливість адаптації моделі до змінних умов експлуатації.

Висновки та рекомендації

У статті уточнено можливості застосування алгоритмів дерев рішень для інтерпретованої класифікації гідроакустичних сигналів. Проаналізовано особливості гідроакустичних сигналів як об'єкта автоматизованої класифікації та встановлено, що їх зашумленість, нестационарність і залежність від параметрів водного середовища потребують використання моделей, здатних працювати з невизначеними та обмеженими даними. Обґрунтовано доцільність застосування дерев рішень як інтерпретованих моделей машинного навчання, структура яких дозволяє простежити послідовність прийняття класифікаційного рішення. Показано, що кожен шлях у дереві рішень може бути поданий у вигляді rule-based правила типу «якщо–то», що забезпечує фізичне та семантичне пояснення результатів класифікації. Узагальнено принцип переходу від

акустичних ознак сигналу до логічних правил класифікації. Визначено, що для побудови таких правил можуть використовуватися спектральні характеристики, рівень інтенсивності, статистичні параметри та часові особливості гідроакустичних сигналів. Систематизовано переваги й обмеження дерев рішень та rule-based підходу в задачах гідроакустичної класифікації.

До основних переваг віднесено прозорість, адаптивність, можливість експертного контролю та придатність до використання в умовах обмежених навчальних вибірок. До обмежень належать чутливість до вибору ознак і порогових значень, а також менша ефективність у задачах зі складними нелінійними залежностями.

На основі аналізу прикладного дослідження класифікації акустичних середовищ Чорного моря показано, що дерева рішень і rule-based логіка доцільні не як заміна всіх методів машинного навчання, а як інструмент пояснюваної підтримки класифікаційних рішень у практичних системах гідроакустичного моніторингу. Рекомендовано використовувати дерева рішень і rule-based правила в тих гідроакустичних системах, де поряд із точністю класифікації важливими є прозорість прийняття рішення, можливість експертної перевірки та адаптація моделі до змінних умов.

Перелік посилань

1. Верлань А. І., Олексій А. О. Огляд та порівняння методів машинного навчання для розпізнавання гідроакустичних сигналів. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2022. Т. 1, № 03. С. 296–306. DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-18>. URL: <https://visn-icct.uu.edu.ua/index.php/icct/article/view/83>. Дата звернення: 14.05.2026.
2. Xie Y., Ren J., Xu J. Guiding the underwater acoustic target recognition with interpretable contrastive learning. OCEANS 2023 – Limerick. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244447>. Дата звернення: 14.05.2026.
3. Wang M., Zhu Z., Qian G. Modulation Signal Recognition of Underwater Acoustic Communication Based on Archimedes Optimization Algorithm and Random Forest. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 5. Article 2764. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052764>. Дата звернення: 14.05.2026.
4. Luo X., Chen L., Zhou H., Cao H. A Survey of Underwater Acoustic Target Recognition Methods Based on Machine Learning. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, No. 2. Article 384. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11020384>. Дата звернення: 14.05.2026.
5. Schwardt M., Pilger C., Gaebler P., Hupe P., Ceranna L. Natural and Anthropogenic Sources of Seismic, Hydroacoustic, and Infrasonic Waves: Waveforms and Spectral Characteristics and Their Applicability for Sensor Calibration. Surveys in Geophysics. 2022. Vol. 43, No. 5. P. 1265–1361. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09713-4>. Дата звернення: 14.05.2026.
6. Song Y.-Y., Lu Y. Decision tree methods: applications for classification and prediction. Shanghai Archives of Psychiatry. 2015. Vol. 27, No. 2. P. 130–135. DOI: <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215044>. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4466856/>. Дата звернення: 14.05.2026.
7. Lee S., Comuzzi M., Kwon N. Exploring the Suitability of Rule-Based Classification to Provide Interpretability in Outcome-Based Process Predictive Monitoring. Algorithms. 2022. Vol. 15, No. 6. Article 187. DOI: <https://doi.org/10.3390/a15060187>. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4893/15/6/187>. Дата звернення: 14.05.2026.
8. Geng X., Yang Z., Jiao L., Zhou Z.-J., Ma Z. Association Rule-Based Classification: A Comprehensive Review of Methodologies and Applications. Expert Systems with Applications. 2025. Vol. 280. Article 127454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127454>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417425010760>. Дата звернення: 14.05.2026.
9. Tran K. Human-Learn: Rule-Based Learning as an Alternative to Machine Learning. Medium. 2023. URL: <https://medium.com/data-science/human-learn-rule-based-learning-as-an-alternative-to-machine-learning-baf1899-ecb3a>. Дата звернення: 14.05.2026.
10. Montgomery R. M. A Comparative Analysis of Decision Trees, Neural Networks, and Bayesian Networks: Methodological Insights and Practical Applications in Machine Learning. Preprints.org. 2024. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202410.1491.v1>. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202410.1491>. Дата звернення: 14.05.2026.
11. Mihailov M. E. Characterization and Automated Classification of Underwater Acoustic Environments in the Western Black Sea Using Machine Learning Techniques. Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13, No. 7. Article 1352. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13071352>. Дата звернення: 14.05.2026.

Ivan Varava

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Software Engineering in Energy
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9874-016X
E-mail: varava_ivan@iit.kpi.ua

Ivan Mayorov

Master's student of the Department of Software Engineering in Energy
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: 0009-0007-9580-8799
E-mail: denatarelcom2105@gmail.com

APPLICATION OF DECISION TREE ALGORITHMS IN THE PROBLEMS OF INTERPRETED CLASSIFICATION OF HYDROACOUSTIC SIGNALS

The article considers the application of decision tree algorithms for the tasks of interpreted classification of hydroacoustic signals in complex marine environment conditions. The relevance of the study is due to the need to combine automated analysis of underwater acoustic data with the ability to explain the classification results, which is critically important for monitoring and security systems. The main attention is paid to the rule-based approach, which allows forming classification solutions based on logical rules with a clear physical and semantic interpretation, without using complex neural models of the "black box" type. The paper analyzes the features of hydroacoustic signals as an object of classification, in particular their non-stationary nature, noise and dependence on the parameters of the aquatic environment. A generalized scheme for constructing a decision tree based on acoustic features of signals, such as spectral characteristics, intensity level, statistical parameters and temporal features, is proposed. It is shown that each path in the decision tree can be represented as a rule-based rule of the "if-then" type, which ensures transparency and controllability of the decision-making process. An example of practical application of a combination of statistical analysis, threshold rule-based classification and machine learning methods for processing hydroacoustic data of the northwestern part of the Black Sea is considered. It is shown that the use of decision trees allows you to work effectively under conditions of limited training samples, reduce the risk of overtraining and adapt the model to expert rules. The results obtained confirm the feasibility of using decision tree algorithms in practical hydroacoustic monitoring systems, where the key requirements are interpretability, adaptability and reliability of classification.

Keywords: decision trees, hydroacoustic signals, classification, rule-based approach, interpreted algorithms, machine learning, software.

Надійшла до редакції (Received): 10.04.2026

Прийнята до друку (Accepted): 12.06.2026

Опубліковано онлайн (Available online): 25.06.2026

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.