

УДК 550.34

О.І. Рибачук¹, В.А. Кирилюк¹, В.В. Стрінада¹, О.І. Лящук², С.І. Клівець³

¹ Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова НАУ, Житомир

² Головний центр спеціального контролю НКА України, Київ

³ Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА РОЗПІЗНАВАННЯ ДЖЕРЕЛ ЗБУРЕНЬ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ГЕОФІЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

В статті наведено методику розпізнавання збурень від грозової активності та хімічних (промислових) вибухів в ближній зоні при використанні акустичної системи геофізичного моніторингу методами теорії статистичних рішень.

розпізнавання збурень, геофізичний моніторинг, акустична система

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

На сучасному етапі розвитку суспільства особлива увага приділяється задачам контролю геофізичної обстановки з метою забезпечення керівництва держави інформацією про аномальні явища природного

або штучного походження, що пов'язані зі значним виділенням енергії.

Тому задачі створення систем локалізації катастроф штучного походження, оцінки координат промислових вибухів, шумового моніторингу довкілля на сьогоднішній день є в значній мірі актуальними.

Для здійснення постійного контролю за геофізичною обстановкою в районах, що знаходяться на території України, або безпосередньо межують з нею (в даному контексті – ближня зона), в Головному центрі спеціального контролю (ГЦСК) Національного космі-

чного агентства України (НКАУ) визначено 11 районів відповідальності (РВ). При розпізнаванні відповідних класів збурень ускладнення викликають саме сигнали з РВ під умовними номерами № 61, 62, 68, 69, 70. Відомості про такі РВ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Відомості про райони відповідальності

№ з/п	№ району	Координати		Характеристика районів
		Широта	Довгота	
1.	Район 61	50° – 53° пн.ш.	18° – 28° сх.д.	Південь Польщі. Південь Білорусії. Волинська, Ровенська області (ровенська АЕС)
2.	Район 62	50° – 53° пн.ш.	28° – 37° сх.д.	Південь Білорусії. Брянська, Київська, Житомирська, Чернігівська, Харківська, Сумська області; ЧАЕС
3.	Район 68	42° – 47° пн.ш.	23° – 28° сх.д.	Район Вранча (Румунія).
4.	Район 69	47° – 50° пн.ш.	18° – 28° сх.д.	Угорщина. Словаччина. Хмельницька, Закарпатська, Львівська, Івано-Франківська, Тернопільська, Чернівецька області
5.	Район 70	47° – 50° пн.ш.	28° – 37° сх.д.	Черкаська, Кіровоградська, Дніпропетровська, Запорізька, Вінницька області. Запорізька АЕС

В більшості випадків (біля 80 % від загальної кількості) при розпізнаванні джерел збурень (ДЗ) використовують таку характерну ознаку, як форма хвильового пакету акустичного сигналу. Але при здійсненні розпізнавання ДЗ існують певні проблемні питання. Форми хвильових пакетів акустичних сигналів в ближній зоні від таких класів збурень, як збурення від грозової активності та хімічні (промислові) вибухи дещо подібні, що збільшує похибки в розпізнаванні ДЗ. Промислові вибухи та збурення від грозової активності відносяться до імпульсних джерел збурень, що генерують інфразвукові хвилі вертикально вгору.

На рис. 1, 2 наведені сигналами збурення від грозової активності та промислового вибуху відповідно, що зареєстровані на пункті спостереження ПС № 013 (Житомирська обл., Малинський р-н, с. Ворсівка) з РВ № 62.

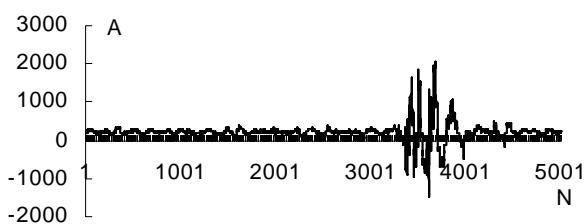


Рис. 1. Форма хвильового пакету акустичного сигналу збурення від грозової активності

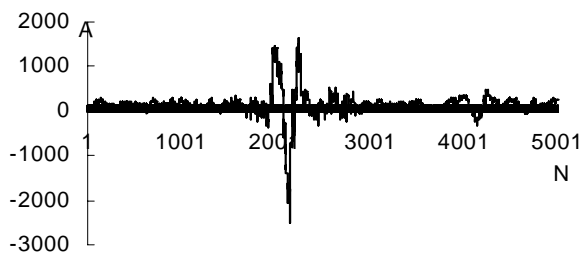


Рис. 2. Форма хвильового пакету акустичного сигналу збурення від промислового вибуху

На теперішній час розпізнавання ДЗ акустичною системою геофізичного моніторингу (АСГМ) здійснюється в "ручному" режимі з використанням досвіду оператора – інтерпретатора. Сутність візуального розпізнавання полягає у визначенні інтерпретатором ступеня схожості (подібності) сигналу, що надходить, сигналам характерних форм відповідних класів збурень. Суттєвими недоліками даного способу розпізнавання є низька оперативність, необхідність в кваліфікованих, досвідчених операторах, трудомісткість самого процесу обробки та необхідність застосування суб'єктивного рішення інтерпретатора. Також в умовах ускладнення заводої обстановки значно збільшуються похибки візуального розпізнавання ДЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить про значний інтерес до питань використання інформації від АСГМ для розв'язання різнопланових завдань [1 – 5]. Так в [1] розглянуті методологічні підходи щодо створення системи акустичного групування з метою підвищення ефективності інфразвукових спостережень. Також в [2] запропонована методика оцінки азимуту на джерело збурення акустичного сигналу та фазової швидкості акустичної хвилі. Крім того, в [3] проведений аналіз можливості застосування АСГМ при розпізнаванні ДЗ штучного походження. В [4, 5] доведена доцільність використання АСГМ для виконання завдань стосовно національної безпеки та оборони держави.

Але методики розпізнавання збурень від грозової активності та хімічних (промислових) вибухів в ближній зоні, що функціонують в автоматизованому (автоматичному) режимі, на даний час в ГЦСК відсутні, тому їх розробка є достатньо актуальним питанням.

Метою статті є викладення методики автоматичного розпізнавання з необхідними показниками якості збурень від грозової активності та хімічних (промислових) вибухів в ближній зоні при використанні акустичної системи геофізичного моніторингу.

Виклад основних результатів досліджень

В основу акустичного методу геофізичного моніторингу покладено реєстрацію та аналіз інфразвукових акустичних коливань атмосферного тиску або густини повітря, що виникають під час збурень атмосфери джерелами штучного походження.

Інфразвукові акустичні коливання являють собою хвилі в такому частотному діапазоні [6]:

$$[v_a \dots 20], \quad (1)$$

де $v_a = \frac{g \cdot \gamma}{4\pi \cdot C_s}$ – гранична акустична частота; g –

прискорення вільного падіння; $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – відношен-

ня питомих теплоємностей; C_p – питома теплоємність при сталому тиску атмосфери; C_v – питома теплоємність при сталому об'ємі атмосфери; C_s – швидкість звука.

Для стандартної атмосфери значення $v_a = 0,0024$ Гц.

Інфразвукові хвилі можуть генеруватися збуреннями природного або штучного походжень. До основних джерел збурень штучного походження (ДЗШП) віднесемо ядерні та хімічні (промислові) вибухи, польоти літаків, великі пожежі тощо [6]. До основних джерел збурень природного походження віднесемо збурення від грозової активності, вітрові перешкоди, перешкоди, що викликані турбулентністю атмосфери, землетруси, магнітні бурі, тайфуни та урагани тощо.

Складність розв'язання задачі розпізнавання сигналів від подібних ДЗ обумовлена змінами характеристик сигналів, близькістю характеристик класів об'єктів розпізнавання та діями перешкод. Ці труднощі в повній мірі стосуються задачі розпізнавання акустичних сигналів від грозової активності та промислових вибухів.

Задача такого типу є задачею розпізнавання об'єкта серед двох відомих класів і є добре вивченою задачею статистичної перевірки гіпотез. Для її вирішення звичайно використовуються такі критерії прийняття рішень: мінімального середнього ризику, мінімаксий, критерій забезпечення допустимого значення помилкової тривоги та ін. Загальним для всіх цих критеріїв є розрахування відношення правдоподібності та його порівняння з відповідним порогом, значення якого визначається обраним критерієм якості [7]:

$$L = w_n (\bar{X} / S_2) / w_n (\bar{X} / S_1) \geq S_{\text{пор}}, \quad (2)$$

де $w_n (\bar{X} / S_k)$ – умовна n-мірна щільність ймовірності амплітуди невідомого акустичного сигналу при умові належності його до класу S_k («функція правдоподібності»); $\bar{X}^T = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ – акустич-

ний сигнал невідомого походження, який може бути представлений як n-мірний вектор значень його амплітуд; $S_{\text{пор}}$ – значення порогу прийняття рішення.

В умовах відсутності відомостей про апріорні ймовірності та матриці ризиків звичайно застосовують критерій максимальної правдоподібності (МП). Даний критерій не потребує знання апріорних ймовірностей класів та функцій втрат, достатньо просто узагальнюється на випадок навчання та на випадок багатьох класів, нескладний в розрахунках.

Для двохальтернативного розпізнавання критерій МП буде мати вигляд

$$S = \begin{cases} S_2, \text{ якщо } L \geq 1; \\ S_1, \text{ якщо } L < 1, \end{cases} \quad (3)$$

де S_1, S_2 – класи збурень, відносно яких необхідно прийняти рішення.

Вирішальним етапом розробки будь-якого алгоритму прийняття рішень, значно впливовим на якість його роботи, є вибір конкретного вигляду функції правдоподібності $w_n (\bar{X} / S_k)$, яка повинна у повній мірі акумулювати всю наявну інформацію про відмінності класів, що розпізнаються.

В статистичній радіотехніці традиційно ступінь подібності сигналів визначається шляхом розрахунку кореляційної функції або коефіцієнту кореляції [7].

В табл. 2 наведені розраховані значення оцінок коефіцієнтів кореляції для реальних акустичних сигналів, ДЗ яких знаходилися в РВ № 61 та зареєстровані на ПС № 013.

Таблиця 2
Оцінка коефіцієнта кореляції

Сигнали	Сигнал 1	Сигнал 2	Сигнал 3
Сигнал 1	0,94821	0,17234	0,019632
Сигнал 2	0,17468	0,92129	0,017468
Сигнал 3	0,019632	0,01746	0,98487

Сигнал 1 – це сигнал від промислового вибуху з тротиловим еквівалентом 0,005...0,008 кт; сигнал 2 – сигнал від промислового вибуху з тротиловим еквівалентом 0,06...0,085 кт; сигнал 3 – сигнал від збурення грозової активності.

Дані табл. 2 ілюструють достатньо високу інформативність коефіцієнта кореляції в умовах даної задачі розпізнавання – коефіцієнт взаємної кореляції сигналів від грози та промислових вибухів приблизно на 1-2 порядки менший, ніж коефіцієнт автокореляції. Тому у якості функції правдоподібності доцільно обрати умовну щільність ймовірності оцінки коефіцієнту кореляції:

$$w_n (\hat{r}_{XY} / S_k) = C \cdot \exp \left(-0,5 D_{S_k} (\hat{r}_{XY} - m_{S_k})^2 \right), \quad (4)$$

де \hat{r}_{XY} – оцінка коефіцієнту кореляції сигналу, що розпізнається (\bar{X}), та певного сигналу \bar{Y} , характерного за умови істинності гіпотези S_k ; D_{S_k}, m_{S_k} – дисперсія та середнє значення оцінки коефіцієнту кореляції.

Розрахунки оцінок \hat{r}_{XY} потребують наявності в системі розпізнавання для кожного класу необхідного набору характерних, так званих “еталонних” сигналів \bar{Y} , який представляє собою сукупність реальних сигналів, головними вимогами до яких є якомога більш яскраве проявлення в них всіх характерних ознак класів, що розпізнаються. Ці еталонні сигнали можуть бути представлені в будь-якому вигляді, наприклад, у вигляді n -мірного числового вектора \bar{Y}_{jK} :

$$(\bar{Y}_{jK})^T = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{nj}), j = \overline{1, J_K}, \quad (5)$$

де y_{ij} – числове значення амплітуди еталонного сигналу в момент часу t_j ; J_K – необхідна кількість еталонних сигналів для класу K .

З виразу (1) слідує, що для мінімізації інформаційних втрат дискретизацію еталонного сигналу необхідно здійснювати частотою не менше, ніж:

$$F_{\text{ДИСКР}} = 2f_{\text{max}} = 40 \text{ Гц}. \quad (6)$$

Це означає, що мінімальна розмірність вектора (5) повинна бути:

$$n = \tau_C F_{\text{ДИСКР}}, \quad (7)$$

де τ_C – тривалість еталонного сигналу. Середня тривалість акустичного сигналу складає 2...3 хв., тому розмірність вектора еталонного сигналу \bar{Y}_{jK} буде в межах $n = 4800 \dots 7200$ дискрет.

Відомо [6], що потужність вибуху значно впливає на період акустичного сигналу, який виробляє цей вибух, тому необхідна кількість еталонних сигналів для класу промислових вибухів J_K буде визначатися перш за все діапазоном можливих потужностей.

Зважаючи на те, що залежність періоду сигналу T (в секундах) від потужності g (в кілотоннах) має вигляд $T \approx 4 \cdot g^{1/3}$, ми можемо визначити необхідний діапазон періодів еталонних сигналів T_e , виходячи з задачі розпізнавання сигналів від вибухів в діапазоні від 0,001 до 0,005 кт ($g_{\text{max}}/g_{\text{min}} = 5$) та в діапазоні від 0,05 до 0,1 кт ($g_{\text{max}}/g_{\text{min}} = 2$), за наближеною формулою

$$T_0/5^{1/3} \leq T_e \leq T_0/2^{1/3} \quad (8)$$

$$\text{або} \quad 0,58 \cdot T_0 \leq T_e \leq 0,79 \cdot T_0, \quad (9)$$

де T_0 – період, що відповідає максимуму енергетичного спектру сигналу від вибуху потужністю 10 кт.

Якщо характерний період коливань акустичного сигналу $T_0 \approx 9$ с, то з виразу (9) слідує, що величини періодів акустичних сигналів від промислових вибухів потужністю 10 кт можуть бути в межах від 20,8 до 28,44 с. З іншого боку, максимальна помилка вимірювання періоду пов'язана з помилкою дискретизації та не перевищує 0,2 с. Тому мінімальна кількість еталонних сигналів з різними періодами, яка необхідна для якісного розпізнавання промислового вибуху, дорівнює

$$J_K = \frac{28,44 - 20,8}{0,2} = 38. \quad (10)$$

Отже, поставлена задача розпізнавання може бути вирішена традиційним і дуже поширеним методом порівняння з еталоном [8]. Згідно з цим методом на опорний вхід системи розпізнавання подається один з еталонних сигналів \bar{Y}_{jK} (5). На сигнальний вхід системи одночасно з опорним подається опис об'єкта розпізнавання у формі прийнятого акустичного сигналу невідомого походження \bar{X} .

У системі розпізнавання відбувається порівняння акустичного сигналу невідомого походження \bar{X} та еталонного сигналу \bar{Y}_{jK} шляхом розрахунку оцінки їх коефіцієнту кореляції \hat{r}_{XY} та значення функції правдоподібності (4). По результатам порівняння функцій правдоподібності система приймає рішення про віднесення сигналу невідомого походження до того або іншого класу.

Оцінку коефіцієнта кореляції будемо проводити за виразом [8]:

$$\hat{r}_{XY} = \hat{K}_{xy} / \sqrt{\bar{D}_x \cdot \bar{D}_y}, \quad (11)$$

де \hat{K}_{xy} – оцінка значення кореляційного моменту сигналів \bar{X} та \bar{Y}_{jK} ; \bar{D}_x, \bar{D}_y – оцінки дисперсій \bar{X} та \bar{Y}_{jK} відповідно.

Умови проведення випробування, потужність збурення та умови реєстрації сигналів впливають на форму сигналу. Було встановлено, що на значення оцінки коефіцієнта кореляції між сигналами одного джерела суттєво впливає неточне знання часу надходження сигналу τ та його середнього періоду коливань T_x .

Для зменшення впливу помилок у визначенні часу надходження сигналу необхідно розрахувати множину оцінок коефіцієнта кореляції на дискретній сітці значень часу надходження сигналу $\hat{r}_{XY}(\tau_l)$ та визначити її максимум:

$$\hat{r}_{XYJ} = \max_l \hat{r}_{XY}(\tau_l), l = 1..m. \quad (12)$$

При цьому інтервал дискретизації $\delta\tau = \tau_{l+1} - \tau_l$ визначається максимальною спектральною частотою акустичного сигналу f_{max} (формула 6); а m – співвідношенням $\delta\tau$ й максимальної помилки часу надходження сигналу.

Для зменшення впливу розбіжності характерного періоду коливань акустичного сигналу необхідно виконати операцію (12) для всіх J_K (5) еталонних сигналів класу, що розпізнається, й обрати максимум:

$$\hat{r}_{XY} = \max_J \hat{r}_{XYJ}. \quad (13)$$

Розрахований за виразами (11 – 13) показник будемо приймати за міру подібності акустичного сигналу невідомого походження одному з класів, що розпізнаються. Показник \hat{r}_{XY} розраховується для

кожного класу окремо по відповідним даному конкретному класу еталонним сигналам. В результаті отримаємо два значення \hat{r}_{XY1} й \hat{r}_{XY2} , які відповідають першому та другому класу.

Наступним кроком є підстановка розрахованих коефіцієнтів кореляції \hat{r}_{XYq} , $q = 1, 2$ в умовні функції правдоподібності (4) та розрахунок відношення правдоподібності (2). В результаті підстановки (4) в (2) вираз для розрахунку відношення правдоподібності прийме вигляд [8]:

$$L = \exp \left\{ -0,5 \cdot (\hat{r}_{XY1} - m_{S1})^2 / D_{S1} + 0,5 \cdot (\hat{r}_{XY2} - m_{S2})^2 / D_{S2} \right\}, \quad (14)$$

де m_{S1}, m_{S2} – математичні сподівання оцінок коефіцієнтів кореляції за умови відповідності невідомого акустичного сигналу відповідному класу; D_{S1}, D_{S2} – дисперсії оцінок коефіцієнтів кореляції.

Логарифмуючи (14) отримаємо вираз для розрахунку відношення правдоподібності при прийнятті рішення про розпізнавання акустичного сигналу за критерієм МП (3):

$$L = \left\{ -\frac{0,5 \cdot (\hat{r}_{XY1} - m_{S1})^2}{D_{S1}} + \frac{0,5 \cdot (\hat{r}_{XY2} - m_{S2})^2}{D_{S2}} \right\} > 0. \quad (15)$$

Ефективність двохальтернативного розпізнавання характеризується чотирьохелементною матрицею показників якості рішень, що приймаються [10]:

$$P_{\text{розп}} = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{21} \\ P_{12} & P_{22} \end{vmatrix} \quad (16)$$

де P_{11} – імовірність правильного розпізнавання класу збурень від грозової активності (клас 1); P_{22} – імовірність правильного розпізнавання класу збурень від промислового вибуху (клас 2); P_{12} – імовірність неправильного розпізнавання класу 1 (об'єкт класу 2, але прийнято рішення, що об'єкт класу 1) – похибка першого роду; P_{21} – імовірність неправильного розпізнавання класу 2 (об'єкт класу 1, але прийнято рішення, що об'єкт класу 2) – похибка другого роду.

Необхідною умовою використання критерію МП повинно бути виконання вимог:

$$P_{11} > 0,5; \quad P_{22} > 0,5; \quad P_{11} + P_{22} > 1. \quad (17)$$

Для перевірки викладеної методики було розраховано значення оцінок коефіцієнтів кореляції за виразами (11...13) для сигналів, що зареєстровані за 7 місяців поточного року на ПС № 013 та ПС № 009 (характеристики відповідних пунктів спостереження наведено в [3]), побудовані гістограми розподілу оцінок, визначено значення ймовірностей правильного та неправильного розпізнавання відповідних класів. Розраховані значення при розпізнаванні розглянутих класів збурень з трьох РВ наведені в табл. 3. Вони свідчать, що значення імовірності правильного розпізнавання відповідних класів збурень викладеною вище методикою знаходяться в межах 0,88...0,95 при

рівні імовірності неправильного розпізнавання $\approx 0,05...0,12$. Ці показники приблизно відповідають показникам якості “ручного” режиму, коли розпізнавання здійснює оператор, покладаючись на візуальні спостереження.

Таблиця 3

Елементи матриць показників якості рішень

РВ	P_{11}	P_{22}	P_{21}	P_{12}
№ 61	0,88	0,92	0,12	0,08
№ 62	0,91	0,94	0,09	0,06
№ 70	0,93	0,95	0,07	0,05

Наведені в табл. 3 дані Недоліком наведеної методики є значний час для здійснення розрахунків, що відповідно вимагає застосування більш оперативних способів знаходження оцінок коефіцієнтів кореляції. Так, при реалізації даної методики у вигляді програми в системі комп'ютерної математики Matlab 6.5 на ПЕОМ з CPU Celeron 633МГц, RAM 512МВ розрахунок коефіцієнту кореляції акустичного сигналу тривалістю 1000 дискретів з еталонною базою 8 сигналів тривав 6 хвилин 23 секунди.

Головною перевагою викладеної методики є можливість уникнення суб'єктивних рішень оператора-інтерпретатора під час розпізнавання відповідних класів ДЗ в ближній зоні.

Висновки

1. Методика розпізнавання двох класів ДЗ (збурення від грозової активності або промислових вибухів) в ближній зоні при використанні АСГМ складається з двох основних етапів: етап визначення міри подібності невідомого сигналу еталонному (11...13) та етап прийняття відповідного рішення про віднесення ДЗ до одного з двох класів збурень (15).

2. Акустичні сигнали від обох класів являють собою широкосмугові коливання, дуже схожі за амплітудними значеннями та частотними характеристиками, але відрізняються значною мірою формою хвильового пакету. Тому найбільш інформативним показником їх подібності доцільно вважати значення оцінки коефіцієнта кореляції.

3. Використання наведеної методики дозволяє уникнути суб'єктивних рішень оператора-інтерпретатора під час розпізнавання відповідних класів ДЗ в ближній зоні.

Перспективами подальших досліджень слід вважати впровадження запропонованої методики розпізнавання джерел збурень в ближній зоні при використанні АСГМ в практику роботи ГЦСК НКАУ.

Список літератури

- Гордиенко Ю.А., Карягин Е.В., Ляшук А.И., Солонец А.И. Построение систем акустического группирования для реализации инфразвукового мониторинга // *Збірник наукових праць ХУ ПС. – X. : ХУ ПС, 2006. – Вип. 3 (52). – С. 36-42.*
- Машков О.А., Кирилюк В.А., Карягин С.В., Качалин І.Г. *Оцінка характеристик джерела инфразвуковых*

коливань техногенного походження малоапертурною акустичною групою // Моделювання та інформаційні технології. – К.: ПІМЕ НАНУ, 2004. – № 29. – С. 47-49.

3. Кирилюк В.А., Стрінада В.В., Ляцук О.І., Шапка В.М. Застосування акустичної системи геофізичного моніторингу при здійсненні ідентифікації джерел збурень техногенного походження в ближній зоні. – Житомир: Вісник ЖДТУ, 2007. – № 2 (41). – С. 77-82.

4. Гуков В.М., Пастушенко Н.С., Солонец А.И., Терещенко И.В., Федотов В.П. О возможности использования сети наблюдения ГЦСК в интересах Вооруженных Сил // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 4 (34). – С. 123-127.

5. Гордиенко Ю.А., Ляцук А.И., Солонец А.И. Возможности инфразвукового мониторинга для использования в интересах Вооруженных Сил // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 4 (53). – С. 207-210.

6. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере: Пер. с англ. / Под ред. Г.С. Голицына. – М.: Мир, 1978. – 524 с.

7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистиче-

ской радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

8. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 342 с.

9. Обробка геофізичних сигналів у сучасних автоматизованих комплексах: Навчальний посібник / В.А. Кирилюк, М.Ф. Пічугін, О.А. Машиков та ін. – Житомир: ЖВІРЕ, 2007. – 176 с.

10. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

Надійшла до редколегії 14.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.